



Elementos Técnicos para la Medición de Huella Hídrica en Sistemas Agrícolas

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) – un Centro de Investigación de CGIAR – desarrolla tecnologías, métodos innovadores y nuevos conocimientos que contribuyen a que los agricultores, en especial los de escasos recursos, logren una agricultura eco-eficiente – es decir, competitiva y rentable así como sostenible y resiliente. Con su sede principal cerca de Cali, Colombia, el CIAT realiza investigación orientada al desarrollo en las regiones tropicales de América Latina, África y Asia.
www.ciat.cgiar.org

CGIAR es una alianza mundial de investigación para un futuro sin hambre. Su labor científica la llevan a cabo 15 Centros de Investigación en estrecha colaboración con cientos de organizaciones socias en todo el planeta.
www.cgiar.org

ISBN: 978-958-694-165-5
E-ISBN: 978-958-694-166-2

Elementos Técnicos para la Medición de Huella Hídrica en Sistemas Agrícolas

Miguel Romero
Marcela Quintero
Fredy Monserrate



Centro Internacional de Agricultura Tropical
Desde 1967 *Ciencia para cultivar el cambio*

Centro Internacional de Agricultura Tropical
Apartado Aéreo 6713
Km 17 Recta Cali-Palmira CP 763537
Cali, Colombia
Teléfono: 57 2 4450000
Fax: 57 2 4450073
Correo electrónico: m.a.romero@cgiar.org
Sitio web: www.ciat.cgiar.org

Publicación CIAT No. 419
Tiraje: 100 ejemplares
Impreso en Colombia
Diciembre 2016

ISBN: 978-958-694-165-5
E-ISBN: 978-958-694-166-2

Romero M; Quintero M; Monserrate F. 2016. Elementos técnicos para la medición de huella hídrica en sistemas agrícolas. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 44 p.

Miguel Romero, ingeniero agrónomo con MSc en Fisiología de Cultivos, es asociado de investigación en el tema de Servicios Ecosistémicos del Área de Investigación en Análisis de Políticas (DAPA) del CIAT.

Marcela Quintero, ecóloga con MSc en Suelos y Agua y PhD en Agronomía, es la líder del tema de Servicios Ecosistémicos del Área de Investigación DAPA del CIAT.

Fredy Monserrate, ingeniero agrónomo con MSc en Sistemas de Información Geográfica, es asociado de investigación en el tema de Servicios Ecosistémicos del Área de Investigación DAPA del CIAT.

Palabras clave: uso, consumo, cuantificación, evaluación, eficiencia.

Derechos de Autor © CIAT 2016. Todos los derechos reservados.

El CIAT propicia la amplia disseminación de sus publicaciones impresas y electrónicas para que el público obtenga de ellas el máximo beneficio. Por tanto, en la mayoría de los casos, los colegas que trabajan en investigación y desarrollo no deben sentirse limitados en el uso de los materiales del CIAT para fines no comerciales. Sin embargo, el Centro prohíbe la modificación de estos materiales y espera recibir los créditos merecidos por ellos. Aunque el CIAT elabora sus publicaciones con sumo cuidado, no garantiza que sean exactas ni que contengan toda la información.

Contenido

Introducción	2
Procedimientos para la Medición de Huella de un Producto Agrícola	5
1. Establecimiento del objetivo de cuantificación	5
2. Caracterización del sistema productivo	7
Delimitación del área productiva	7
Recolección de información climática	7
Caracterización física y química de suelos	8
Elaboración del esquema de mediciones	9
3. Mediciones en campo	9
HUELLA HÍDRICA VERDE	9
Agua verde - Precipitación	10
Evapotranspiración	10
HUELLA HÍDRICA AZUL	26
Medición en sistemas de acceso de agua por tubería	27
Medición en sistemas de acceso de agua por canal	28
HUELLA HÍDRICA GRIS	31
Cálculo según tipo de descarga del contaminante	31
Medición de HH_{gris} en fuentes puntuales de contaminación	32
Estudios de Caso	38
1. Medición de Huella Hídrica en el Cultivo de Maíz	38
2. Medición de Huella Hídrica en el Cultivo de Arroz	39
3. Medición de Huella Hídrica en el Cultivo de Papa	40
4. Medición de Huella Hídrica en la Producción de Biodiesel de Palma de Aceite	41
5. Medición de Huella Hídrica en Lechería Especializada	42
Referencias	43

Figuras

Figura 1.	Normas internacionales para la cuantificación y evaluación de huella hídrica.....	3
Figura 2.	Localización y delimitación de lotes productivos.	7
Figura 3.	Estación meteorológica.....	7
Figura 4.	Toma de muestra de suelo para caracterización física y química.....	8
Figura 5.	Esquema de medición y posibles herramientas.....	9
Figura 6.	Tipos de pluviómetros.....	10
Figura 7.	Evaporación de agua del suelo y transpiración desde la superficie foliar.....	10
Figura 8.	Uso de tanque evaporímetro y tornillo micrométrico para lectura de lámina de agua evaporada.	11
Figura 9.	Diseño de un lisímetro neumático de pesada.....	12
Figura 10.	Lisímetro neumático de pesada.....	13
Figura 11.	Extracción de suelo y separación en sus diferentes horizontes.	13
Figura 12.	Instalación de un lisímetro neumático de pesada.	14
Figura 13.	Calibración del lisímetro neumático de pesada con pesos conocidos	14
Figura 14.	Ejemplo de curva de calibración de un lisímetro neumático de pesada.....	15
Figura 15.	Componentes del balance de humedad del suelo	15
Figura 16.	Determinación del contenido de humedad mediante el método gravimétrico.....	16
Figura 17.	Uso de sensores de humedad para determinar el contenido de agua en el suelo	17
Figura 18.	Sondas de profundidad para caracterización de la humedad en el perfil del suelo	17
Figura 19.	Instalación de parcelas de escorrentía en terreno de ladera.....	18
Figura 20.	Drenajes para recolección de exceso de humedad en los lotes.....	19
Figura 21.	Configuración de archivo clima	20
Figura 22.	Configuración de unidades de trabajo.....	20
Figura 23.	Coordenadas del predio	21
Figura 24.	Incorporación de datos climáticos.....	21
Figura 25.	Configuración de archivo de precipitación	22
Figura 26.	Configuración archivo de cultivo.....	22

Figura 27.	Configuración archivo de suelo.....	23
Figura 28.	Pestaña de requerimientos hídricos.....	24
Figura 29.	Pestaña de cronograma de riego.....	24
Figura 30.	Archivo de programa de riego.....	25
Figura 31.	Riego por aspersión en un cultivo de maíz y por inundación en un cultivo de arroz.....	27
Figura 32.	Medidor de caudal en un sistema de riego por aspersión.....	27
Figura 33.	Lectura en un medidor de caudal.....	28
Figura 34.	Adecuación de entradas y salidas de agua para instalación de un aforo.....	28
Figura 35.	Ubicación de un aforo tipo RBC.....	29
Figura 36.	Instalación de un aforador de caudal.....	29
Figura 37.	Funcionamiento de un sensor de ultrasonido.....	30
Figura 38.	Instalación de un sensor de ultrasonido y <i>datalogger</i>	30
Figura 39.	Identificación de puntos de salida de agua por escorrentía superficial.....	32
Figura 40.	Cuantificación de agua de percolación profunda mediante un lisímetro de pesada.....	33
Figura 41.	Toma de muestras de calidad de agua a la salida del lote.....	33
Figura 42.	Uso de lisímetros de succión para toma de muestras de agua de percolación profunda.....	34
Figura 43.	Tubos de recolección de muestras de agua percolada.....	34
Figura 44.	Equipos para caracterización de calidad de agua.....	35
Figura 45.	Ubicación de predios en la cuenca y tramo de influencia.....	36

Cuadros

Cuadro 1.	Objetivos de calidad para la cuenca de los ríos Simijaca, Chiquinquirá y Suárez.....	36
Cuadro 2.	Límites máximos permitidos según autoridad nacional o internacional.....	37
Cuadro 3.	Límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.....	37



Introducción

El agua cubre cerca del 75% de la superficie del planeta. Sin embargo, solo el 2.5% del total del agua disponible es dulce y se concentra en su gran mayoría en glaciares y aguas subterráneas. Y del total del agua dulce, solo el 0.4% se encuentra en la atmósfera, ríos y lagos, y debe ser distribuida entre consumo humano, sector industrial y agricultura (Arévalo et al., 2012; PNUMA, 2012). Se calcula que en los próximos años la cantidad de agua necesaria para producir los alimentos, fibras y biocombustibles requeridos por la población se incrementará hasta en un 55% debido al aumento poblacional y al cambio en los patrones de consumo (ONU, 2014).

A nivel mundial, la actividad agrícola usa alrededor del 70% de toda el agua consumida en el planeta. En Colombia, el uso total del agua es cercano a los 36 mil millones de m³, de los cuales un 46.6% se destinan a la agricultura, siendo el sector que más agua consume frente al sector energía (21.6%), pecuario (8.5%) y doméstico (8.2%) (Arévalo et al., 2012).

Diferentes sectores han identificado las crisis de abastecimiento de agua como uno de los riesgos principales a nivel mundial. Estudios previos indican que, adicional al incremento acelerado de la presión sobre los cuerpos de agua dulce en las últimas décadas (WBCSD, 2013), los fenómenos climáticos extremos se hacen cada vez más frecuentes, generando períodos de sequía

más intensos y prolongados en diferentes regiones del planeta (IPCC, 2007; ONU, 2014).

Estos fenómenos extremos tienen un mayor impacto sobre los sectores estrechamente vinculados al clima y a la alta demanda de agua, como lo son la agricultura, silvicultura, ganadería, salud humana y turismo (IPCC, 2007; ONU, 2014). Según reportes, cerca del 53% del sector empresarial a nivel global ya está sufriendo impactos críticos relacionados con el agua, como disminución en el suministro de agua dulce, incremento en las tarifas o daños asociados a inundaciones (Deloitte, 2012). Dado que la agricultura usa como insumo directo la cantidad y calidad del agua, es el principal sector a ser categorizado en nivel de alto riesgo (IPCC 2007; ONU, 2014).

En el país, el café es el producto agrícola con mayor consumo hídrico (22%), seguido del maíz (13%), arroz (12%), plátano (11%) y caña de azúcar (11%) (Arévalo et al., 2012). El uso y consumo de agua está asociado a actividades específicas como riego, fertilización, manejo de plagas y enfermedades, lavado de equipos y procesos de poscosecha. Sin embargo, en un contexto de gestión integral del agua, no es suficiente solo identificar usos directos del agua, sino además caracterizar la cadena de suministro completa. Todo esto permite asociar los impactos ambientales de un sistema productivo a una unidad de producto de consumo, para así mejorar la comprensión del carácter global del agua dulce (Hoekstra y Hung, 2002; 2005; Hoekstra et al., 2011).

La *huella hídrica* se presenta como un indicador de sostenibilidad que permite identificar el volumen de agua utilizada directa o indirectamente en un proceso productivo, discriminando los posibles usos que se dan al recurso hídrico y el impacto de las diferentes prácticas de manejo.

Huella hídrica: hacia un uso consciente del agua

El concepto de huella hídrica fue dado a conocer en 2002 por Arjen Hoekstra, como un indicador para cuantificar el consumo de agua para producir bienes y servicios, buscando un valor que pudiera reflejar el impacto del consumo humano en los recursos globales de agua dulce (Hoekstra y Hung, 2002; 2005). El interés en la huella hídrica creció rápidamente después de su introducción en la literatura académica y con la creciente inclusión de los conceptos de responsabilidad social corporativa, dependencia del agua y riesgo relacionado con el agua en diferentes empresas del sector agroalimentario, usando el indicador como un punto clave en la generación de estrategias de reducción de impacto ambiental y a la vez para reforzar la imagen corporativa, permitiendo distinguir a un productor en un mercado que demanda sostenibilidad (Hoekstra et al., 2011).

Según la Red Internacional de Huella Hídrica (WFN, por sus siglas en inglés) (<http://waterfootprint.org>), la huella hídrica se define como el volumen total de agua dulce

Conceptos clave

Extracción de agua: Agua retirada de un cuerpo hídrico superficial o subterráneo.

Consumo de agua: Es entendido como el uso consuntivo, siendo la diferencia entre el volumen del agua que ingresa a un sistema y el volumen descargado. El uso está determinado por las pérdidas por evaporación, la incorporación en un producto o el movimiento del agua a otra zona de captación.

Uso de agua: Agua aplicada en una actividad o proceso y que retorna al mismo cuerpo de agua. No se presentan pérdidas pero sí se pueden presentar cambios en la calidad (Hoekstra et al., 2011).

usado por personas, empresas o países para producir, consumir o utilizar bienes y servicios. Este indicador tiene en cuenta los usos directos e indirectos del agua y tiene especificidad espacio-temporal (Hoekstra et al., 2011; Franke et al., 2013). Por su parte, la organización ISO, en su normativa internacional 14046, define la huella hídrica como un parámetro que cuantifica los posibles impactos ambientales relacionados con el agua, entre ellos la eutrofización, salinización, acidificación, escasez, etc. Todo esto bajo el esquema de análisis de ciclo de vida (ISO, 2014) (Figura 1).

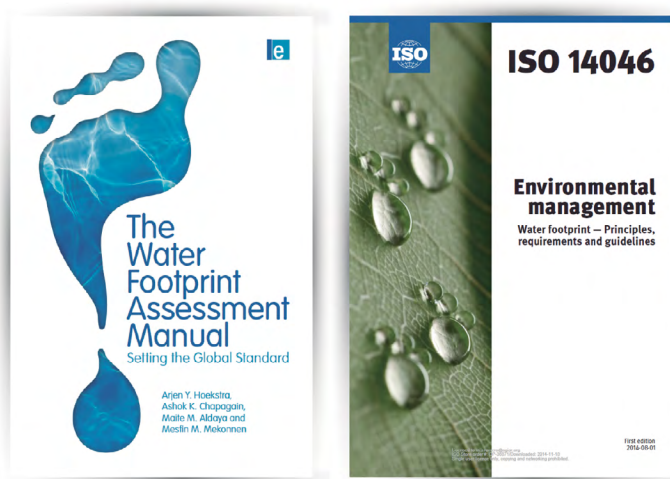


Figura 1. Normas internacionales para la cuantificación y evaluación de huella hídrica.

Para efectos de su cálculo y conceptualización, la WFN divide el indicador en tres componentes:

La **huella hídrica azul** es la cantidad de agua extraída de un cuerpo de agua superficial o subterránea que se utiliza en un proceso, se evapora o se incorpora en un producto.

La **huella hídrica verde** es la cantidad de agua lluvia que se utiliza en un proceso, se evapora o se incorpora en un producto. En el suelo se almacena como humedad.

La **huella hídrica gris** es el volumen de agua requerido para diluir los contaminantes generados en un proceso hasta alcanzar la calidad exigida por las regulaciones locales.

Utilidad de la cuantificación de la huella hídrica en sistemas agrícolas

- Cuantificar el uso y consumo de agua.
- Generar consciencia de dónde y cómo se utiliza el recurso hídrico.
- Identificar los riesgos potenciales a los que se enfrenta un sistema productivo bajo un escenario de déficit hídrico.
- Tomar mejores decisiones sobre cómo manejar el recurso hídrico y gestionar procesos.
- Participar en políticas locales y nacionales de sostenibilidad ambiental y productiva que permitan reglamentar acciones concretas para su ahorro.

En 2011, la WFN publicó *The Water Footprint Assessment Manual* (Manual para la Evaluación de la Huella Hídrica) (Hoekstra et al., 2011), el cual es el más usado a nivel mundial. Brinda una orientación general para las estimaciones en empresas, productos, procesos, individuos y comunidades, pero en algunos otros casos, es evidente la necesidad de un mayor desarrollo de directrices prácticas, más aún cuando se busca obtener información primaria de uso de agua en un cultivo y no depender de información secundaria o estimaciones locales, que en la mayoría de los casos pueden no estar disponibles.

Así, el principal problema que se presenta a la hora de hacer una evaluación es la falta de información local y, por ende, la necesidad de generarla. La incertidumbre en los datos utilizados en la contabilidad de la huella hídrica puede ser muy alta, lo que significa que los resultados deben ser interpretados con cautela en la mayoría de los casos.

En este contexto, es relevante formular e implementar una metodología adecuada de mediciones directas en campo que generen información de todos los procesos involucrados en la obtención de un producto. Esto sería

aún más útil para la evaluación de la huella hídrica de un producto específico en ciertas condiciones en un momento determinado. Todo esto con el fin de generar estrategias o planes de acción específicos y más efectivos a condiciones locales.

En esta guía, se presentan diferentes elementos técnicos para la cuantificación de la extracción, uso y consumo de agua por los sistemas agropecuarios, teniendo en cuenta los diferentes aspectos relacionados con la cuantificación de la huella hídrica. A manera de estudios de caso, se presentan los trabajos de cuantificación de huella hídrica en los sistemas productivos de maíz, papa, arroz, palma de aceite y lechería especializada, realizados en el marco del convenio MADR-CIAT “Clima y Sector Agropecuario, Adaptación para la Sostenibilidad Productiva”.

Conceptos clave

Estimar la huella hídrica: Recolección y análisis de información secundaria (por ej., de bases de datos) con el fin de establecer un valor lo más aproximado posible al valor real de la huella hídrica.

Medir la huella hídrica: Implementación de protocolos y herramientas para cuantificar directamente en campo el uso y consumo de agua en las diferentes fases de un proceso.

Evaluar la huella hídrica: Conjunto de actividades para cuantificar y localizar la huella hídrica de un proceso, evaluar la sostenibilidad ambiental, social y económica y formular una estrategia de respuesta para su disminución. En términos generales, hacer que las actividades y los productos puedan ser más sostenibles desde la perspectiva del agua (Hoekstra et al., 2011).



Procedimientos para la Medición de Huella de un Producto Agrícola

La huella de un producto será la suma de las huellas hídricas de todos los procesos necesarios para la fabricación o elaboración de este producto. En este sentido, la huella hídrica de un productor (empresa,

compañía) se define como la suma de las huellas hídricas de todos los productos que elabora el productor. La huella hídrica total de un proceso es la suma de los componentes verde, azul y gris:

$$HUELLA\ HÍDRICA = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris}$$

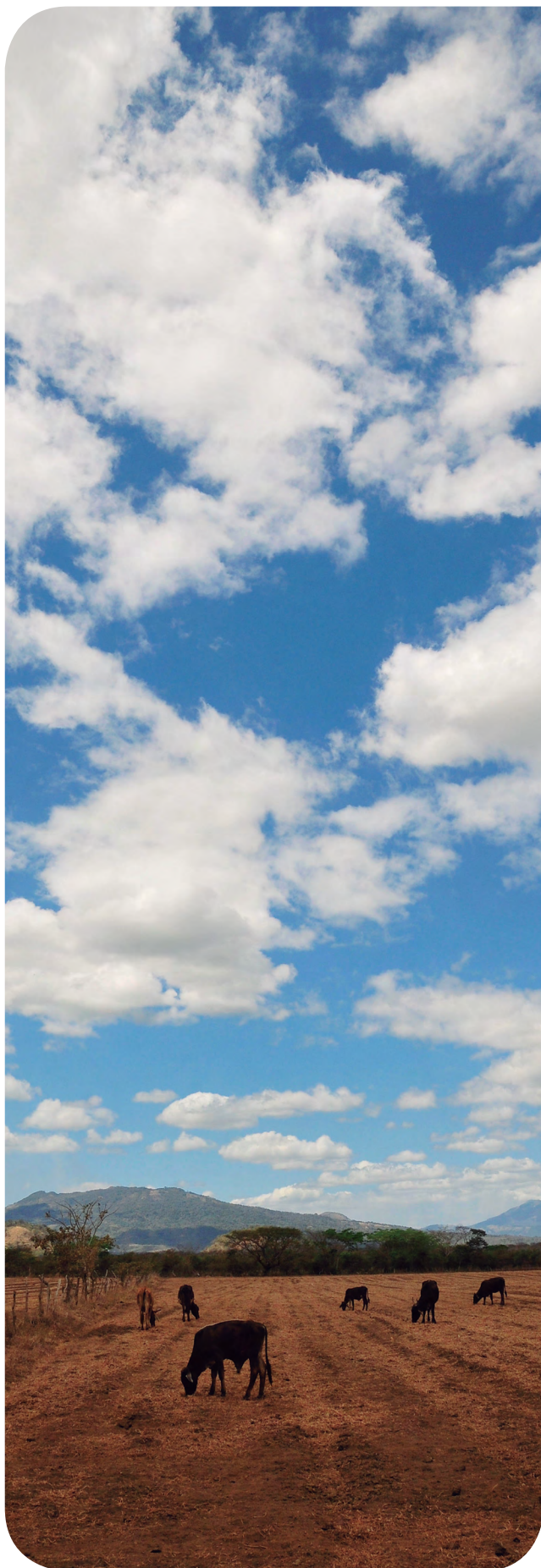


1. Establecimiento del objetivo de cuantificación

El primer punto para el cálculo está relacionado con la definición de los parámetros que van a ser contemplados en la caracterización, donde se identifica el sistema productivo que será objeto de estudio y el producto bandera a caracterizar por su huella hídrica.

Es importante definir las reglas de corte que se van a seguir a la hora de diseñar el esquema de medición. Entre ellas se encuentran:

- **Alcance:** Se debe definir el objeto de estudio, ya sea un producto agropecuario, el sistema productivo con sus diferentes subproductos o la cadena de suministro completa, desde la extracción de materias primas hasta el uso final. Se debe definir si se tiene en cuenta la huella hídrica directa o si se incluye también la indirecta.
- **Tiempo de evaluación:** Se debe limitar el período de evaluación. En el caso de cultivos semestrales, se recomienda un ciclo productivo completo, mientras que en el caso de cultivos perennes, una o varias cosechas, siempre y cuando se considere en los cálculos los consumos asociados a la fase vegetativa.



- **Temporalidad:** Definir los períodos de información a considerar. En el caso de cultivos, se recomienda evaluar por lo menos dos ciclos: uno en época de alta disponibilidad hídrica y otro ciclo en época de baja disponibilidad.
- **Espacialidad:** Determinar el lugar de cuantificación, ya que de ello depende la definición de los parámetros de calidad de agua y la normatividad vigente.
- **Parámetros a cuantificar:** Como primer paso, se deben establecer los tipos de huella que se desean cuantificar (azul, verde o gris) para establecer el inventario de la cantidad de entradas y salidas de agua del sistema y los focos de contaminación.

Conceptos clave

Huella hídrica directa: Volumen del agua dulce consumida o contaminada en las operaciones objeto de estudio. En el caso de agricultura, hace referencia al agua empleada en el cultivo. En el caso de ganadería, es el agua destinada a las operaciones del ganado, como bebederos y uso en servicios. Dado que aborda las operaciones directas del proceso, puede ser mediada con facilidad (Hoekstra et al., 2011).

Huella hídrica indirecta: Volumen del agua dulce consumida o contaminada en las operaciones que no se pueden atribuir de forma directa al objeto de estudio, pero que ocurren de forma general en las operaciones de la cadena de suministro. En el caso de agricultura, hace referencia al agua empleada en la producción de insumos; en el caso de ganadería, es el agua destinada a la producción de los alimentos para los animales. Dado que se presenta en escenarios externos al sistema objeto de estudio, no puede ser medida con facilidad y, en la mayoría de los casos, se usa información secundaria para su estimación (Hoekstra et al., 2011).

2. Caracterización del sistema productivo

Delimitación del área productiva

La delimitación del área productiva es importante a la hora de hacer mediciones directas de huella hídrica, ya que, si se desea calcular el consumo de agua por unidad producida, es necesario llevar los datos a términos de hectárea y luego a rendimiento por hectárea. Los caudales de agua de riego deben ser asignados a un

área específica de riego para poder calcular las láminas aplicadas. De igual forma, el área de la zona de cultivo es necesaria para calcular la cantidad de efluentes por hectárea y unidad producida.

Una herramienta práctica y útil para delimitar el área de un predio es a través de Google Earth, teniendo los puntos georreferenciados del área productiva, levantados con un GPS. Con esta herramienta, es posible crear mapas y calcular el área de cada unidad productiva (Figura 2).

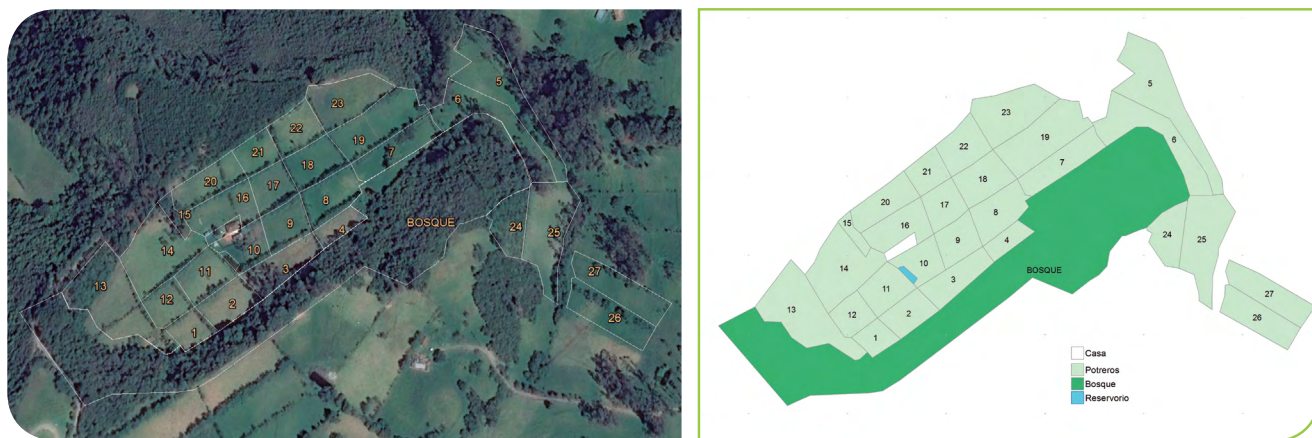


Figura 2. Localización y delimitación de lotes productivos.

Recolección de información climática

Los registros diarios de una estación climática de influencia en la zona son de gran importancia, ya que permiten conocer la distribución de las lluvias en la

región a lo largo de un año para así poder determinar las épocas más apropiadas para recolectar información relacionada con el uso del agua (Figura 3).



Figura 3. Estación meteorológica.

Caracterización física y química de suelos

En los sistemas agropecuarios, el suelo es el soporte base del esquema productivo, ya que funciona como receptor del ingreso de agua, sistema de almacenamiento y punto de transferencia de agua a la planta y la atmósfera, dependiendo de sus propiedades físicas determina la cantidad de agua que puede ser retenida para consumo por las plantas y la cantidad lámina que atraviesa el perfil y sale del sistema. La aplicación de abonos y enmiendas y su interacción con las propiedades físicas y químicas va a definir el impacto potencial sobre cuerpos de agua superficiales y profundos. Por esta razón, se recomienda hacer una caracterización completa de las propiedades en cada horizonte, ya que esta información es útil para

el análisis y la validación de los resultados obtenidos. A continuación, se relacionan los puntos más importantes para ser tenidos en cuenta a la hora de recolectar muestras de suelos.

En un área representativa a todo el terreno, se debe hacer una calicata de aproximadamente un metro de profundidad en la cual se hace la diferenciación, marcado y medición de los horizontes. Esta diferenciación se hace generalmente por cambios en color, textura y dureza (Figura 4a). Una vez se demarcan los horizontes, se debe proceder a tomar muestras de cada uno para análisis. El método más sencillo es hacer un cajón en una de las paredes de la calicata que llegue hasta la mitad de cada horizonte, donde se procede a insertar los anillos para análisis físico y químico (Figura 4b y Figura 4c).



Figura 4. Toma de muestra de suelo para caracterización física y química. (a) Calicata y diferenciación de horizontes. (b) Instalación y (c) Preparación de la muestra.

Las muestras deben ser enviadas a un laboratorio de suelos acreditado, donde se recomienda hacer las siguientes determinaciones:

- **Caracterización física (muestras no disturbadas):** Curvas de retención de humedad, donde se incluyen parámetros como porosidad, densidad aparente, densidad real, humedad gravimétrica y volumétrica a punto de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

- **Caracterización química:** pH, carbón orgánico oxidable, materia orgánica, fósforo, potasio, calcio, magnesio, aluminio, sodio, azufre, amonio, nitrato y nitrógeno total.

Los resultados del análisis de física de suelos son necesarios para el cálculo de la evapotranspiración mediante el balance de humedad del suelo, mientras que los resultados de química de suelos, junto con el balance de fertilización, son importantes para la interpretación de los resultados de huella hídrica gris.

Elaboración del esquema de mediciones

A continuación, se ilustra de manera general el esquema de medición en campo, donde se listan los parámetros a caracterizar y la posible técnica de medición (Figura 5).

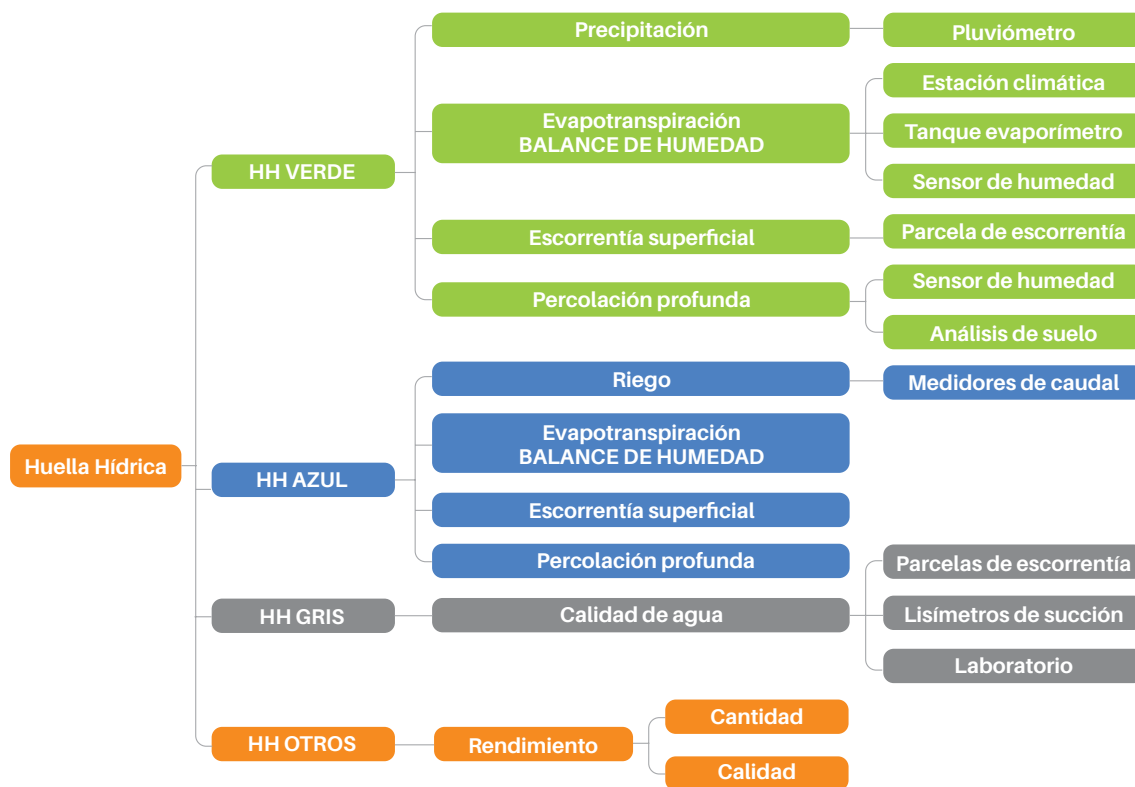


Figura 5. Esquema de medición y posibles herramientas.

3. Mediciones en campo

HUELLA HÍDRICA VERDE

La huella hídrica verde es el volumen de agua lluvia consumida durante un proceso productivo. Esta presenta una mayor importancia en sistemas de producción agrícola, forestales y pastoriles, donde se refiere a la evapotranspiración del agua de lluvia y al agua incorporada en la cosecha o la plantación arbórea.

La huella hídrica verde en una fase del proceso es igual a:

$$HH_{\text{verde}} (\text{m}^3/\text{ton}) = \frac{\text{Evapotranspiración de agua verde} + \text{Incorporación de agua verde}}{\text{Rendimiento}}$$

Conceptos clave

Incorporación de agua verde: El agua verde incorporada hace referencia al agua lluvia que es tomada por la planta y almacenada en los órganos de interés agronómico. Para su cuantificación, se debe tener en cuenta el porcentaje de humedad de la parte cosechable de la planta y el rendimiento del cultivo. Con los valores de lámina total precipitada y lámina total de riego, se hace la respectiva asignación del porcentaje de agua incorporada que proviene de la precipitación.

Rendimiento: El valor del rendimiento es de gran importancia, ya que una vez obtenido el consumo total de agua verde, azul y gris, este debe ser dividido entre el rendimiento del cultivo para así determinar los litros de agua consumidos por unidad producida.

Agua verde - Precipitación

El agua verde representa el agua lluvia. Para determinar la cantidad, se hace necesario contar con un pluviómetro que registre diariamente los valores lámina de agua lluvia. Existen diferentes opciones para su registro, que van desde pluviómetros de medición manual, pluviómetros automáticos, hasta estaciones climáticas completas con transmisión de datos (Figura 6). De ser posible,

se puede usar información de una estación climática cercana que refleje las condiciones de la zona. Para obtener los valores de precipitación en m^3/ha , solo se debe multiplicar la lámina por 10, ya que si una hectárea tiene una superficie de 10.000 m^2 y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una lluvia de 1 mm corresponde a 10 m^3 de agua por hectárea, es decir, 1 mm/día es equivalente a $10 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{día}$.

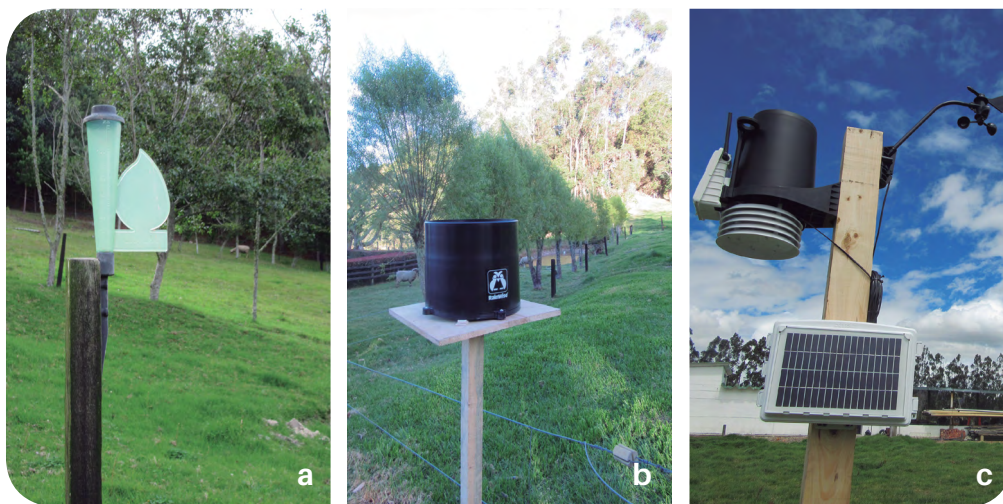


Figura 6. Tipos de pluviómetros a) manual, b) de registro automático y c) incorporado en estación climática.

Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se define como el proceso combinado de pérdida de vapor de agua por transpiración desde las hojas de las plantas más el agua que se pierde desde la superficie del suelo por evaporación (Figura 7). Casi toda el agua absorbida por las raíces

desde el suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (agua incorporada). Se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo, al igual que la lámina de precipitación. Para obtener la cantidad de agua evapotranspirada en m^3/ha , solo se debe multiplicar la lámina por 10 (Allen et al., 2006).



Figura 7. Evaporación de agua del suelo y transpiración desde la superficie foliar.

Dada la complejidad de los factores involucrados en el proceso de evapotranspiración, su medición no es fácil. Experimentalmente, se requieren técnicas específicas y mediciones precisas de varios parámetros físicos. Los métodos de campo son generalmente costosos, dependiendo de la técnica empleada y el nivel de precisión requerido. Sin embargo, a la hora de cuantificación de huella hídrica, son recomendados ya que arrojan mediciones reales de condiciones diarias donde la interacción entre los diferentes factores determinantes de la evapotranspiración es compleja y puede llegar a diferir de las estimaciones de ET obtenidas con métodos indirectos (Allen et al., 2006).

El consumo de agua por evapotranspiración puede ser determinado mediante cuatro protocolos principales:

1. Medición de la tasa de evapotranspiración del cultivo, mediante el uso de un tanque evaporímetro para medir la evapotranspiración de referencia y su multiplicación por el coeficiente del cultivo.
2. Medición de la tasa de evapotranspiración real del cultivo mediante el uso de lisímetros.
3. Cálculo por medio de balance hídrico a través del uso de sensores de humedad, caracterización física de suelos, y balance de entradas y salidas de agua.
4. Estimación con modelos con base en parámetros de clima, suelo y cultivo.

Para términos de cálculo de la huella hídrica, la lámina total evapotranspirada por el cultivo es la sumatoria de la lámina de evapotranspiración de agua lluvia más la evapotranspiración de agua de riego.

$$\text{Evapotranspiración} = \text{Evapotranspiración}_{\text{agua verde}} + \text{Evapotranspiración}_{\text{agua azul}}$$

En sistemas sin riego, donde el único ingreso de agua al sistema es a través de la precipitación, toda la lámina evapotranspirada corresponde a la huella hídrica verde.

En sistemas con riego, el agua evapotranspirada puede provenir de la lluvia (HH verde) o del riego (HH azul). Por tal razón, es importante conocer la lámina de agua lluvia, la lámina de agua de riego y la lámina total evapotranspirada durante el ciclo del cultivo

para determinar los componentes verde y azul de la evapotranspiración, mediante asignación de porcentajes.

Uso del tanque evaporímetro para la medición de la evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo se puede obtener mediante métodos de medición indirecta, como el uso del tanque evaporímetro (Figura 8).

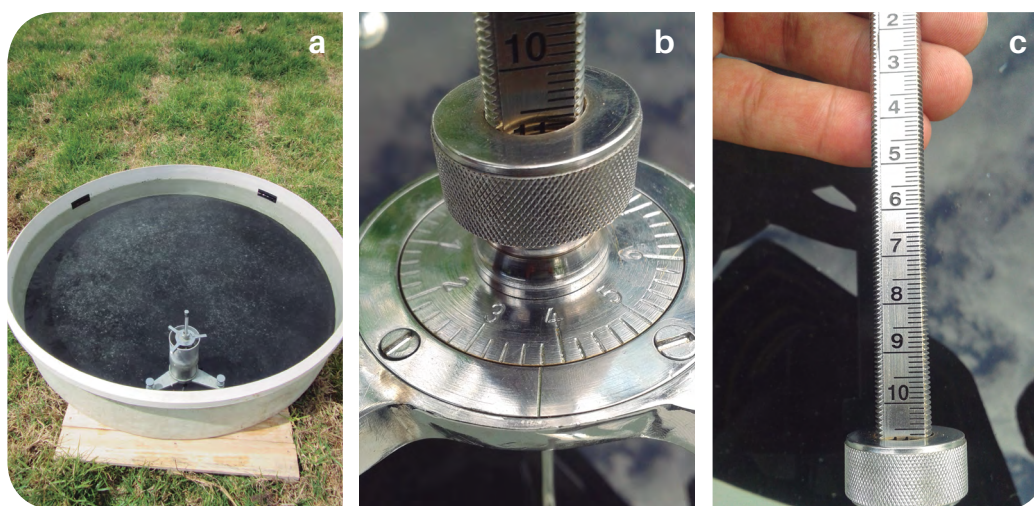


Figura 8. Uso de tanque evaporímetro y tornillo micrométrico para lectura de lámina de agua evaporada.

Las lecturas se hacen diariamente, registrando el nivel de la lámina de agua mediante el uso de un tornillo micrométrico que presenta el valor de lámina evaporada en décimas de milímetro. Las lecturas se deben realizar cerca de las 7 a.m. La diferencia entra la medición del día actual y el día anterior representa la lámina de agua evaporada en el transcurso de las últimas 24 horas.

Una vez se cuenta con el valor de EV registrado en el tanque evaporímetro, se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_0), que es el consumo de agua de un cultivo hipotético en crecimiento activo de 8–15 cm de altura uniforme, que cubre toda la superficie del suelo y donde solo el clima determina la evapotranspiración. Esto a partir de la relación:

$$ET_0 = EV * K_t$$

Se debe tener en cuenta el coeficiente de tanque (K_t), el cual es un valor que depende de las condiciones de viento y humedad relativa prevalecientes. En promedio es de 0.70, es decir que la ET_0 es aproximadamente el 70% de la EV en una superficie libre de agua (Allen et al., 2006).

De igual manera, la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se obtiene de la ET_0 a partir de la relación:

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

El coeficiente del cultivo (K_c) integra los efectos de las características que distinguen a un sistema de referencia

de un cultivo típico de campo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento afectarán el valor de K_c (Allen et al., 2006).

Medición directa de la ET mediante el uso de lisímetros de pesada

Dentro de los métodos directos, el uso de lisímetros tiene gran importancia, ya que aparte de reflejar un valor más real de las condiciones del cultivo, sirve de patrón de referencia para los métodos indirectos. Los lisímetros de pesada han sido utilizados a nivel mundial para la medición directa de la ET_0 , la ET_c , la precipitación efectiva (PE), la cantidad de agua percolada y la calidad de esta, así como para estudiar los efectos del clima sobre la evapotranspiración y desempeño de los cultivos (Khan et al., 1998; Allen et al., 2006; WMO, 2012).

Se componen de un tanque con suelo y una o varias plantas, dependiendo del cultivo, dispuestas sobre un instrumento sensible de medida, como una balanza, celda de carga o un neumático lleno de agua en su versión más simple. Las pérdidas y ganancias de peso del sistema pueden ser traducidas a pérdidas y ganancias de humedad y, por consiguiente, a un ingreso de agua por precipitación o riego y a una salida de agua por evapotranspiración o percolación (Figura 9).

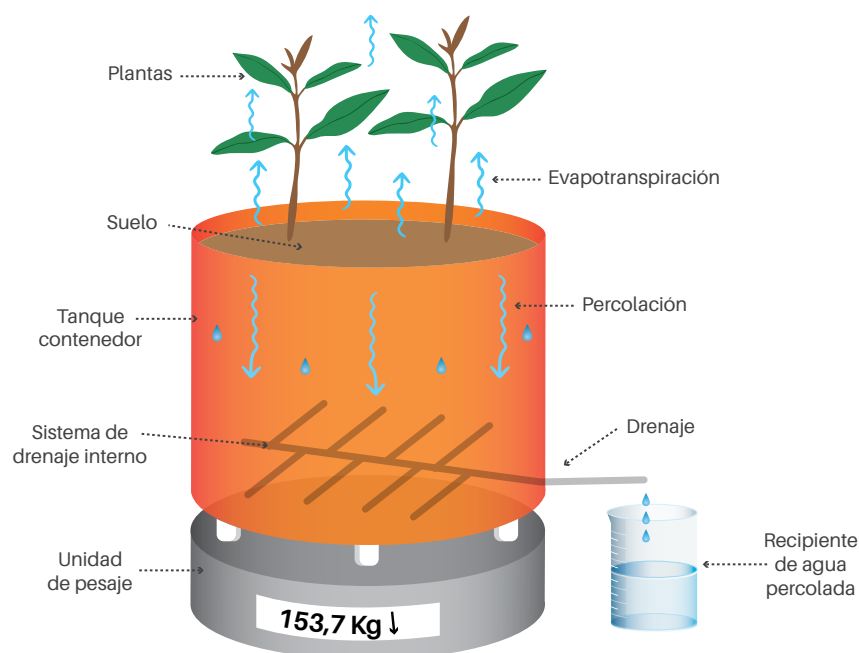


Figura 9. Diseño de un lisímetro neumático de pesada.

Dependiendo de su nivel de precisión, los lisímetros pueden llegar a ser costosos y su operación y mantenimiento pueden requerir especial cuidado, razón por la cual, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos; sin embargo, se pueden considerar opciones de fabricación más simples y menos costosas. A continuación, se presenta una guía con los procedimientos para la construcción, instalación, calibración y uso de un lisímetro neumático de pesada en campo, con el fin de hacer seguimiento diario a la evapotranspiración. Adicionalmente, el sistema permite cuantificar la cantidad de agua que sale del perfil del suelo, de la cual se puede tomar una muestra para caracterizar su calidad.

Instalación, calibración y uso de un lisímetro neumático

Un lisímetro neumático de pesada consta de una caneca, dentro de la cual se deposita el perfil del suelo y se siembran las plantas. En la base de su interior,

tiene ubicada una red de tubos de PVC con orificios, los cuales permiten el drenaje de agua del sistema hacia el exterior a través de un tubo central. La caneca se coloca sobre una base en madera y esta a su vez sobre un neumático lleno de agua. La válvula del neumático se conecta a una manguera que actúa como piezómetro y refleja la presión que ejerce el peso de la caneca sobre el neumático. Todo el sistema está confinado en un cilindro de mayor dimensión con el fin de aislar la caneca interna y el neumático. Para recolectar el agua percolada por el lisímetro, la caneca interior en su base tiene un tubo de PVC que se conecta con un recipiente externo que recoge el agua percolada (Figura 10).

Para la instalación del lisímetro en campo, se debe hacer una calicata. Su profundidad está dada por la altura del lisímetro, de tal forma que quede al mismo nivel de la superficie del terreno. El suelo que es extraído de la calicata debe ser recolectado y separado en sus diferentes horizontes (Figura 11).



Figura 10. Lisímetro neumático de pesada.



Figura 11. Extracción de suelo y separación en sus diferentes horizontes.

Se debe ubicar el contenedor externo en la calicata (Figura 12a) y dentro de este ubicar el neumático lleno de agua (Figura 12b). Se debe conectar la manguera del piezómetro con la válvula del neumático. Se procede a llenar la caneca interna con el suelo extraído con los horizontes en su orden y profundidad. A continuación, se ubican las plántulas o semillas sobre el suelo (Figura 12c). La caneca con suelo se coloca sobre el

neumático con el orificio de drenaje dirigido hacia el tubo de recolección de agua percolada. Sobre el listón de madera, se ubica la manguera y una regla milimétrica para hacer la posterior calibración y lecturas del nivel del agua en el piezómetro. Finalmente, se ubica una sombrilla para evitar el ingreso de agua lluvia al sistema interno (Figura 12d).



Figura 12. Instalación de un lisímetro neumático de pesada. (a) Ubicación del contenedor externo. (b) Instalación del neumático y unión al piezómetro. (c) Establecimiento de plantas. (d) Instalación del protector.

Las pérdidas o ganancias de humedad del lisímetro ocasionan una variación en el peso del sistema y esto, a su vez, una variación en la presión sobre el neumático, lo que genera un desplazamiento del agua desde el neumático al piezómetro y viceversa. Un incremento del nivel de la columna de agua en el piezómetro significa un aumento de peso del sistema, y una disminución en el nivel de la columna significa una pérdida de humedad del sistema.

Para su calibración, se colocan pesos conocidos encima del sistema y se registra el aumento de la columna de agua en el piezómetro, según la adición de cada peso (Figura 13). La curva de calibración del lisímetro (Figura 14) está dada por la ecuación:

$$y = ax + b$$

Donde y es el desplazamiento de la columna de agua, a es la pendiente de la curva, y x es el peso.



Figura 13. Calibración de lisímetro neumático de pesada con pesos conocidos.

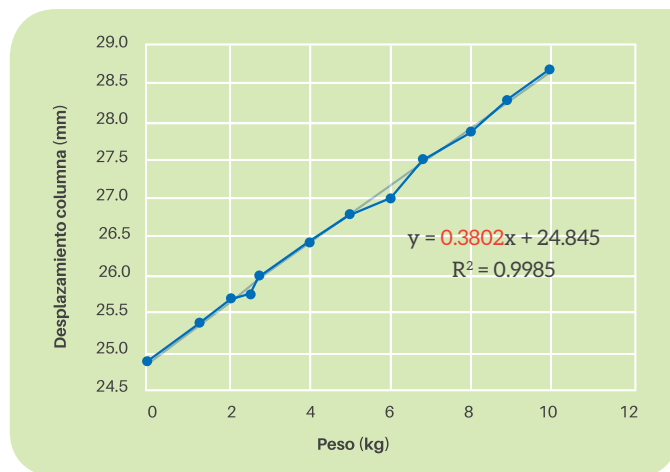


Figura 14. Ejemplo de curva de calibración de un lisímetro neumático de pesada.

Una vez calibrado, se deben registrar los valores de columna de agua en el piezómetro diariamente en horas de la mañana. En caso de presentarse un evento de precipitación o riego, se debe registrar la lámina correspondiente. La diferencia entre la lámina de dos días consecutivos se traduce en lámina perdida por el sistema.

Es importante tener en cuenta que la diferencia se asume como negativa cuando el sistema gana peso y como positiva cuando el sistema pierde peso.

Para transformar este valor en lámina evapotranspirada, se corrige el valor de la diferencia, utilizando el área efectiva del lisímetro y la pendiente de la curva de calibración del mismo, por medio de la siguiente forma:

$$ET_C = \frac{\text{Altura día 2} - \text{Altura día 1}}{\text{Área lisímetro} * a}$$

Donde *a* es el valor de la pendiente de la curva de calibración.

Cálculo de la ET por medio de balance hídrico en el suelo

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo en un determinado período de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radical, mientras que la evapotranspiración (ET), escorrentía superficial (ES) y percolación profunda (D) pueden remover agua del suelo. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces o ser transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia adentro (FS_{in}) o afuera (FS_{out}) de la zona radicular. Sin embargo, estos tres últimos flujos son mínimos y difíciles de medir; por tanto, pueden no considerarse en períodos cortos de tiempo (Allen et al., 2006) (Figura 15).

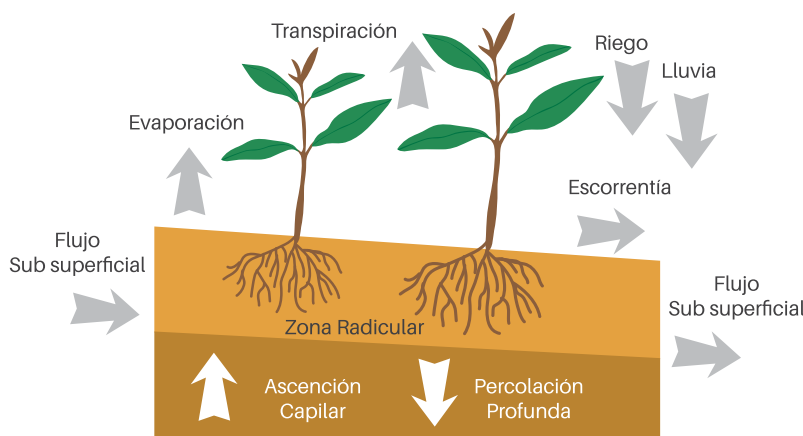


Figura 15. Componentes del balance de humedad del suelo.

Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede despejar a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔHS) a lo largo de un período de tiempo:

$$(R + P + C + FS) - (ET + ES + D) = \pm \Delta HS$$

De la ecuación, se debe tener en cuenta qué parámetros se pueden medir directamente en campo y cuáles deben ser estimados:

Precipitación (P): Como se mencionó previamente, el ingreso de agua al sistema a través de la precipitación se evalúa mediante la instalación de pluviómetros.

Riego (R): La cuantificación de la lámina de riego se explicará más adelante en el módulo de huella hídrica azul.

Flujo subsuperficial (FS): Excepto bajo condiciones de pendientes muy pronunciadas, normalmente los valores de FS_{in} y FS_{out} son mínimos y pueden no ser considerados.

Cambios en la humedad del suelo (ΔHS): Un factor fundamental en el balance hídrico para determinar evapotranspiración depende de la medición permanente del contenido de humedad en el suelo de forma eficiente y rápida. Los métodos más conocidos se resumen a continuación:

Método gravimétrico: Es un método de buena precisión y bajo costo, aun así se hace dispendiosa la recolección continua de muestras del suelo (Allen et al., 2006; Martin, 2010). Se realiza por medio de un muestreo de suelo en un anillo metálico. La muestra es pesada para determinar su peso inicial o en húmedo y llevada a secado de 105 °C por 24 a 48 horas dependiendo del tipo de suelo, para luego ser nuevamente pesada en seco (Figura 16) y así determinar porcentaje de humedad gravimétrica mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad Gravimétrica} = \frac{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100$$



Figura 16. Determinación del contenido de humedad mediante el método gravimétrico.

Sensores de humedad - Resistencia eléctrica: Es un método confiable para determinar el contenido de humedad en el suelo. El principio físico de estos dispositivos se basa en que el contenido de humedad se relaciona con la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo. Entre más agua hay en el suelo, más baja es la resistencia (Martin, 2010). Los sistemas de medición de humedad

constan de sondas, las cuales se insertan en el suelo. Una sonda central genera una señal eléctrica, la cual es recibida por las sondas externas y, dependiendo de la constante dieléctrica del suelo, aire y agua, se determina el contenido de humedad volumétrica del suelo. Según el sensor usado, es recomendable hacer la calibración al tipo de suelo según instrucciones del fabricante.

Los sensores de humedad deben ser ubicados en la zona de crecimiento activo de raíces de forma horizontal. Una vez instalado el sensor, se recomienda tapar nuevamente el hueco para evitar una mayor pérdida de agua del suelo cercano al sensor. La mayoría de estos sistemas cuentan con la opción de registro automático de datos. Para

realizar el balance de humedad, son necesarios valores diarios. Sin embargo, para una mayor comprensión de la dinámica del ingreso o salida de agua del sistema después de un evento de riego o precipitación, se recomienda efectuar lecturas cada hora (Figura 17).



Figura 17. Uso de sensores de humedad para determinar el contenido de agua en el suelo.

Existen en el mercado otras herramientas más robustas, como sondas de profundidad, las cuales pueden acceder hasta un metro de profundidad. Estas trabajan a partir de lecturas de la capacitancia eléctrica del suelo por medio de un sensor encapsulado en una sonda que se sube o se baja dentro de un tubo de acceso para medir

la humedad a la profundidad deseada. El equipo está integrado a una unidad de registro donde se almacenan las lecturas de humedad volumétrica. Es un equipo ágil y confiable para medir la humedad del perfil del suelo (Figura 18).

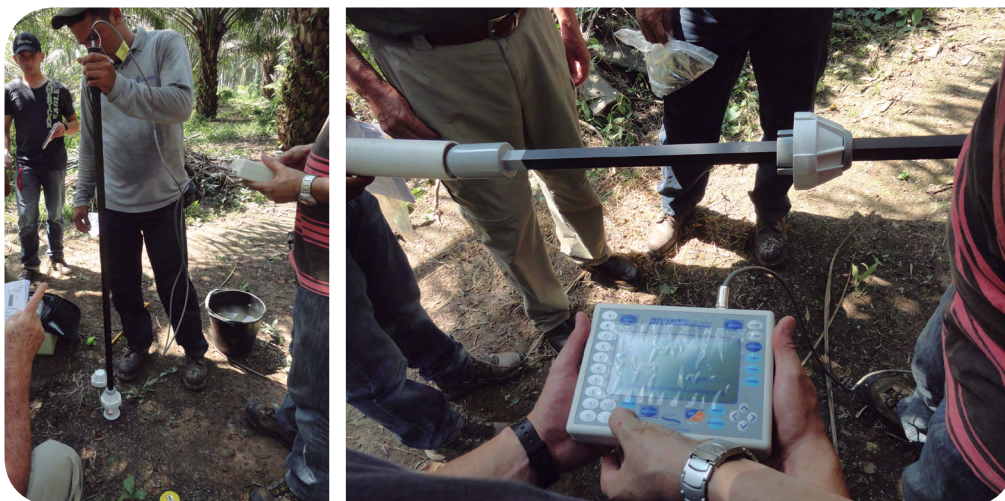


Figura 18. Sondas de profundidad para caracterización de la humedad en el perfil del suelo.

Escorrentía superficial (ES): La escorrentía superficial es la fracción de la precipitación o riego que no se infiltra ni se evapotranspira y que circula por la superficie del suelo según la dirección de la pendiente. En cultivos donde la pendiente es nula, la escorrentía superficial es mínima. Sin embargo, esta se vuelve significativa en un evento de una fuerte precipitación, riego excesivo o riego por gravedad (Morales, 1996; Allen et al., 2006). Para el caso de sistemas de producción en ladera donde la escorrentía juega un papel importante, se sugiere la implementación de parcelas de escorrentía, las cuales permiten recolectar el agua que se desplaza superficialmente.

Las parcelas constan de un área delimitada lateralmente por láminas enterradas hasta 20 cm de profundidad. Esto para evitar filtraciones hacia y desde el interior de la parcela de escorrentía y asegurar que la causante de la escorrentía sea únicamente la precipitación que cae sobre el área delimitada. En la parte baja de la parcela, se debe instalar una canal horizontal a ras del suelo para coleccionar el agua y evitar pérdidas por infiltración en esta área de mayor acumulación. La parte inferior de la canal se une a un recipiente coleccionador de agua a través de un tubo conector, el cual debe tener una malla en la entrada para evitar el paso de sedimentos (Figura 19).



Figura 19. Instalación de parcelas de escorrentía en terreno de ladera.

Por promedios históricos en la zona, se determina la lámina máxima de precipitación. Por lo tanto, el cálculo de la capacidad del sistema se hará con base en el volumen máximo de agua:

$$VmE (m^3) = S (m^2) * H (m)$$

Donde VmE es el volumen máximo de agua de escorrentía (m^3), S es el área de la parcela (m^2) y H es la altura máxima de la lámina de agua que puede ingresar en un evento de lluvia. El cálculo de la intensidad máxima de escorrentía de la parcela está dado por:

$$ImE = S \times I$$

Donde ImE es la intensidad máxima de escorrentía de la parcela, S es la superficie de la parcela e I es la

intensidad de escorrentía (m/s), o también intensidad máxima de lluvia. Este dato puede expresarse en altura de agua escurrida por segundo (m/seg) o también en volumen máximo de agua por segundo (m^3/seg).

La cantidad de agua de escorrentía se calcula determinando el volumen de agua recolectado en los cilindros. Conociendo el valor del radio del cilindro, la altura alcanzada por el agua se calcula con la siguiente fórmula:

$$V = r^2 \times h$$

Donde V es el volumen de agua de escorrentía en un evento de lluvia, r es el radio del cilindro coleccionador y h es la altura de la columna de agua alcanzada dentro del cilindro (Morales, 1996).

Capilaridad (C): La estimación de algunos parámetros, como la capilaridad, es dispendiosa y costosa, por lo cual se propone controlar el ascenso capilar mediante canales de drenaje (Figura 20), que garantizan la evacuación del agua por percolación profunda, evitando así la subida del nivel freático y por ende el ascenso capilar del agua a un perfil más superficial.

Percolación profunda (D): La percolación es el proceso de filtración del agua a las capas profundas del suelo. Las pérdidas por exceso de humedad se obtienen con base en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, de tal forma que si la suma de la precipitación y el riego exceden el déficit de agua, el exceso de lámina se asume como agua perdida por percolación profunda, ya que la matriz del suelo no es capaz de retenerla. Es importante contar con los valores de capacidad de campo (CC) de los horizontes del suelo.

$$\text{Déficit} = \begin{cases} 0 & \text{si } W \geq CC \\ CC - W & \text{si } W < CC \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} 0 & \text{si } P + R \leq \text{Déficit} \\ P + R - \text{Déficit} & \text{si } P + R > \text{Déficit} \end{cases}$$

Estimación de la ET con base en el aplicativo CROPWAT

CROPWAT es un aplicativo libre que permite hacer un balance hídrico para un sitio y cultivo específicos. Requiere información climática y de suelos, así como de parámetros básicos de los cultivos, como la duración de las etapas de crecimiento y los coeficientes de cultivo. Con la información de clima calcula la ET_0 y, con la información de suelos, riego y cultivo, estima un balance hídrico que permite calcular la ET_c en las condiciones de humedad y manejo del agua de riego que se quieran estimar (Allen et al., 2006).

Opciones de configuración de las variables de entrada: En CROPWAT > Archivo > Nuevo es posible configurar la periodicidad de las variables de entrada tanto de Clima/ ET_0 o precipitación a nivel mensual o diario, además de seleccionar el cultivo y los valores por defecto que tiene la base de datos de la FAO.



Figura 20. Drenajes para recolección de exceso de humedad en los lotes.

Conceptos clave

Capacidad de campo: Es el contenido de humedad máximo que puede retener el suelo, se presenta después que los macroporos se han drenado completamente.

Punto de marchitez permanente: Es el punto de humedad mínima, en el cual una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y no puede recuperarse de la pérdida hídrica.

Agua aprovechable: Es el agua disponible en el suelo para toma por las raíces, es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Jaramillo, 2002).

• Configuración de la pestaña Clima/ET₀:

En CROPWAT>Archivo>Nuevo>Clima/ET₀>ET₀ Penman Monteith diaria se crea el archivo con las variables a nivel diario que se importan desde Excel (Figura 21).

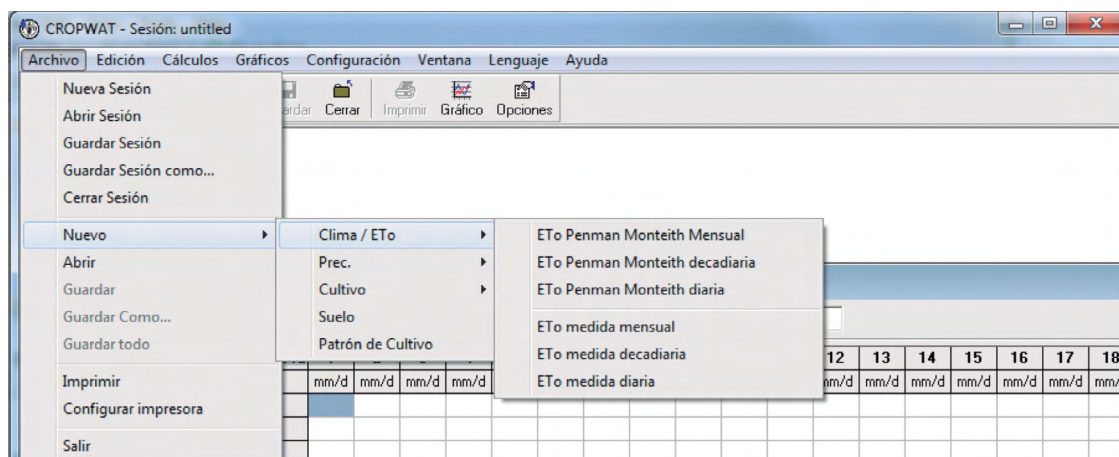


Figura 21. Configuración de archivo clima.

Las variables climáticas mínimas necesarias para calcular la ET₀ son temperatura mínima y máxima, se pueden incluir variables adicionales como humedad relativa, velocidad del viento e insolación. A partir de esta información, el modelo calcula la radiación (MJ/m²/día) y ET₀ (mm/día).

En caso de usar solo temperaturas máxima y mínima, antes de crear el archivo, se debe configurar en

Opciones>ET₀ Penman Monteith la opción “ET₀ Penman calculada de datos de temperatura (otros datos estimados)”. Si no se cuenta con el valor de la radiación, se diligencian los demás datos y automáticamente el programa diligenciará esta columna con valor de -99 y usará una fórmula con base en la latitud para calcularla.

Luego de crear el archivo de clima en Opciones>Clima/ET₀ configurar las unidades de trabajo (Figura 22):

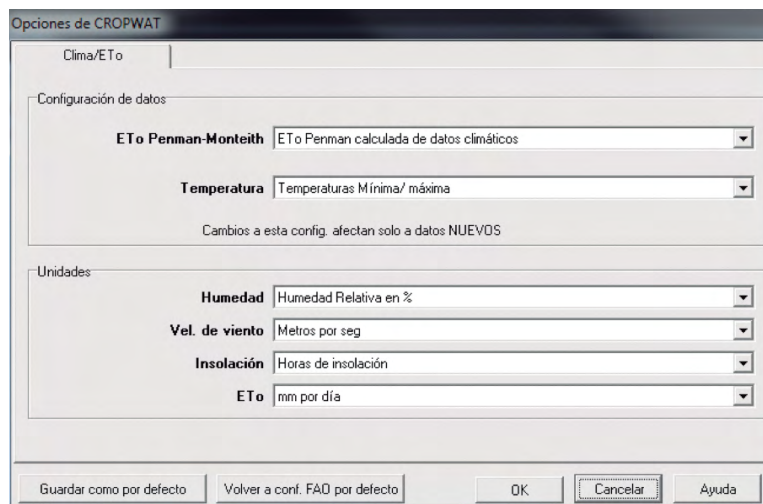


Figura 22. Configuración de unidades de trabajo.

En seguida, en la hoja de datos, diligenciar los valores solicitados teniendo especial cuidado de diligenciar

correctamente la latitud, que luego será usada por el programa (Figura 23).

Figura 23. Coordenadas del predio.

En cada pestaña mensual, se agregan los datos climáticos con al menos un mes antes de siembra y un mes después de cosecha. El pegado se puede hacer de forma básica desde Excel sobre la primera celda de la

tabla de CROPWAT y, una vez diligenciado el valor de la latitud de la estación, se calcula automáticamente la radiación y ET₀ (celdas amarillas) (Figura 24).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Fecha	decada	ppmm	T.Min	T.Max	HR	W.Speed	H.Luz	
2	8/1/2014	1	0	22.5	35.5	45.83	2.08	10	
3	8/2/2014	1	0	24.1	32.6	50.08	2.18	9.5	
4	8/3/2014	1	0	21.4	33.6	50.88	1.50	8.5	
5	8/4/2014	1	0	19.9	34.3	58.13	0.76	11	
6	8/5/2014	1	1.2	22.5	27.9	77.08	0.95	9	
7	8/6/2014	1	0	22.2	33.2	62.25	1.64	9	
8	8/7/2014	1	0	21.8	33.4	61.15	1.20	9.5	
9	8/8/2014	1	0	21.8	33.2	61.81	0.93	10	
10	8/9/2014	1	0	23.2	35.3	56.42	1.56	10	
11	8/10/2014	1	0	21.9	33.6	60.65	1.01	10.5	
12	8/11/2014	2	0	22.6	34.5	63.75	0.89	10.5	
13	8/12/2014	2	5.8	20.8	33.7	75.77	0.80	9	
14	8/13/2014	2	2.4	21.7	32.3	68.50	1.12	10	
15	8/14/2014	2	0	20.8	33.6	60.19	1.88	10	
16	8/15/2014	2	0	23	35.2	47.06	2.17	10.5	
17	8/16/2014	2	0	25.1	33.4	49.48	2.04	9	
18	8/17/2014	2	0	22.6	33.5	50.75	2.26	10.5	
19	8/18/2014	2	0	23.8	32.8	49.46	2.02	9.5	
20	8/19/2014	2	0	23.4	32.9	48.13	2.59	9	
21	8/20/2014	2	0	21.3	34.2	45.04	2.30	10	
22	8/21/2014	3	0	20.2	34.1	43.00	1.50	10	
23	8/22/2014	3	0.2	19.7	35.4	49.90	1.05	10	
24	8/23/2014	3	0	21.8	28.8	69.17	1.13	8.5	
25	8/24/2014	3	0	21.7	34	65.15	1.14	9.5	
26	8/25/2014	3	47.2	20.3	28.7	84.92	0.86	5	
27	8/26/2014	3	0	21.3	31.7	77.06	1.02	9	
28	8/27/2014	3	0	21.5	30.7	75.67	0.66	9.5	
29	8/28/2014	3	3.2	21	29	86.85	0.66	8	
30	8/29/2014	3	0.8	21.6	33.1	66.06	1.55	10.5	
31	8/30/2014	3	0	20.3	35.2	49.88	1.67	10.5	
32	8/31/2014	4	0	22.8	35.6	41.15	1.92	10.5	
33	9/1/2014	4	0	21.5	35.7	49.29	1.32	10.5	
34	9/2/2014	4	1.4	21.6	31.1	66.29	0.79	8	
35	9/3/2014	4	2.6	19.8	34.7	63.81	1.00	10.5	
36	9/4/2014	4	1.4	20.6	34.4	67.94	1.24	10.5	
			Original	Resumen_Dia_CROPWAT	Precipitación_Dia_CROP				

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Día	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo						
1	23.1	30.8	89	30	9.0	22.4	4.50						
2	22.5	31.9	84	20	8.0	20.9	4.25						
3	22.3	29.7	88	36	9.0	22.4	4.40						
4	22.3	29.7	88	36	9.0	22.4	4.40						
5	21.9	27.9	92	38	4.0	15.0	3.03						
6	22.6	30.6	90	50	8.0	21.0	4.23						
7	21.6	31.3	86	0	10.0	24.0	4.73						
8	22.9	30.1	90	45	10.0	24.0	4.74						
9	22.3	31.0	90	3	9.0	22.6	4.54						
10	22.2	29.2	91	35	9.0	22.6	4.41						
11	21.7	31.0	85	25	10.0	24.1	4.75						
12	23.3	30.2	88	43	10.0	24.2	4.80						
13	22.8	20.9	89	57	10.0	24.2	4.82						
14	22.1	28.1	90	45	10.0	24.2	4.60						
15	22.5	31.8	86	21	10.0	24.3	4.88						
16	22.6	28.6	90	44	9.0	22.8	4.48						
17	23.0	28.9	92	58	8.0	21.3	4.18						
18	21.9	26.8	92	59	9.0	22.8	4.10						
19	22.1	28.5	89	18	8.0	21.3	4.16						
20	22.6	27.0	92	15	8.0	21.4	4.12						
21	22.5	30.4	85	59	10.0	24.4	4.83						
22	21.8	31.3	84	51	10.0	24.5	4.86						
23	22.6	30.9	85	27	9.0	21.0	4.64						
24	22.2	32.3	85	22	10.0	24.5	4.94						
25	22.3	26.1	93	82	6.0	18.4	3.47						
26	20.9	25.3	94	57	7.0	20.0	3.65						
27	21.8	27.6	92	17	9.0	23.0	4.41						
28	22.2	24.7	94	43	10.0	24.6	4.46						
29	21.7	31.9	89	28	10.0	24.6	4.95						
30	21.0	33.8	81	23	10.0	24.6	4.99						
31	22.9	33.6	82	23	11.0	26.2	5.37						
Promedio	22.3	29.7	88	36	9.0	22.8	4.48						

Figura 24. Incorporación de datos climáticos.

Finalmente, en CROPWAT>Archivo>Guardar como..., se guardan los datos climáticos en formato *.PED. Estos deben ser cargados para el cálculo del balance hídrico.

• Configuración de la pestaña Precipitación (Prec.)

Por defecto, la entrada de datos es mensual. Para configurarla de forma diaria, se selecciona la opción

CROPWAT>Nuevo>Prec.>Diaria, en donde se obtiene una tabla con valores de cero para todos los días del año y se diligencia con el valor de la precipitación de acuerdo al procedimiento descrito en el paso anterior. Así, el programa calcula la precipitación efectiva mensual basada en la corrección de los valores diligenciados y una fórmula empírica. Finalmente, el archivo de precipitaciones se guarda en formato *.CRD (Figura 25).

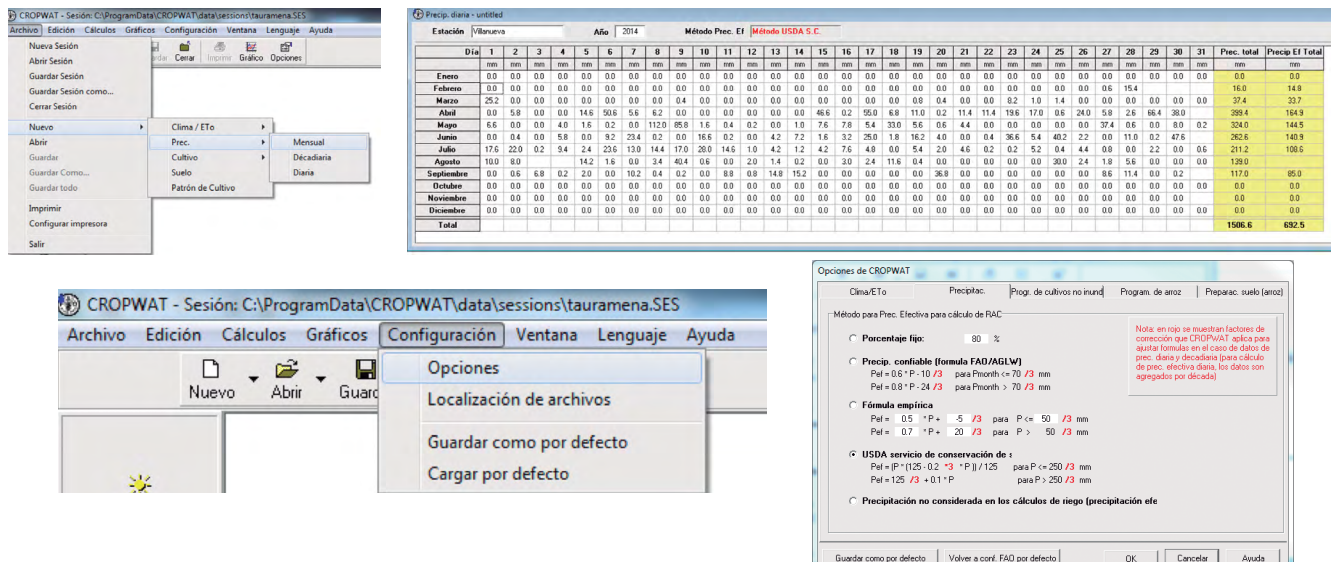


Figura 25. Configuración de archivo de precipitación.

• Configuración pestaña Cultivo

Se crea una nueva ventana en el botón 'Cultivo' y se modifica la fecha de siembra del cultivo, luego se cargan los valores por defecto para el cultivo deseado que trae el programa y se realizan las modificaciones necesarias. Luego de crear y cargar los valores por defecto (ejemplo, caso del archivo de arroz -RICE.CRO- que viene con el programa y se encuentra en la carpeta CROPWAT/data/crops/FAO), se realizan las siguientes modificaciones:

Preparación de suelo: Número de días desde el inicio de la preparación hasta la siembra. *Etapas inicial (Ini)*

se extiende desde la fecha de siembra o trasplante hasta que el cultivo cubra aproximadamente el 10% de la cubierta del suelo. *Etapas de desarrollo del cultivo (Des)* se extiende desde el momento en que el cultivo cubre el 10% del suelo hasta la plena cobertura. La cobertura completa para muchos cultivos se produce al inicio de la floración. *Etapas de mediados de temporada (Med)* se extiende desde la cobertura plena hasta el inicio de la madurez. *Etapas final (Fin)* se extiende desde el inicio de la madurez hasta la cosecha. El total de días debe coincidir con el período entre la siembra y la cosecha y es la suma de la duración de cada etapa, desde la inicial hasta la cosecha (Figura 26).

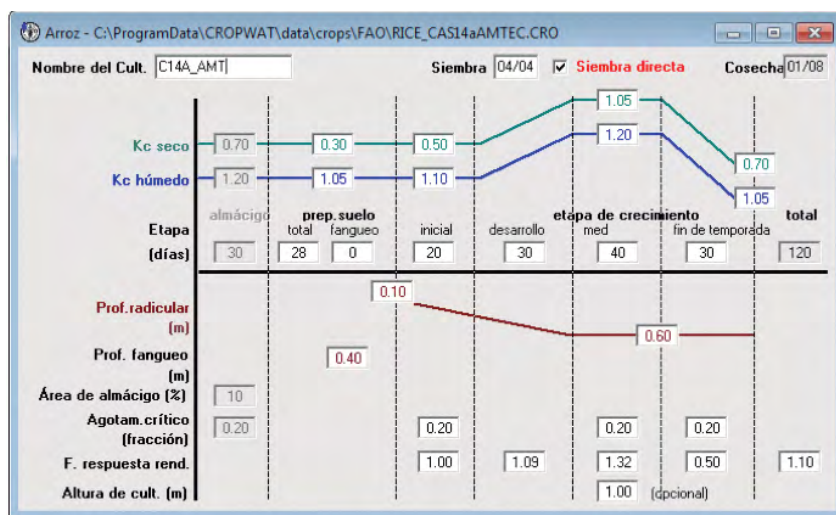


Figura 26. Configuración archivo de cultivo.

• Configuración de la pestaña Suelo

En esta pestaña, se deben adicionar tres características hidrofísicas del suelo y una de las condiciones iniciales de humedad. A continuación, se muestra cómo configurar cada parámetro de la pestaña (Figura 27).

Figura 27. Configuración archivo de suelo.

Humedad de suelo disponible total (CC-PMP) [mm/metro]: Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$HDT = \frac{CC - PMP}{100} * da (g/cc) * Prof (mm)$$

Donde *HDT* es la humedad disponible total, *CC* es el porcentaje de humedad a capacidad de campo, *PMP* es el porcentaje de humedad en el punto de marchitez permanente, *da* es la densidad aparente, *Prof* es la profundidad de cada horizonte en mm. Cuando en el perfil del suelo hay más de un horizonte, se suman los valores para llegar al valor de mm/m. Si la profundidad efectiva del perfil es menor a 1 m, se debe calcular solo hasta la profundidad efectiva.

En la *Tasa máxima de infiltración de la precipitación [mm/día]*, se asume el valor de capacidad hidráulica saturada. La *Profundidad radicular máxima [cm]* se determina en campo de acuerdo al cultivo y la profundidad efectiva del perfil de suelos. El *Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT) [%]* es un porcentaje del contenido de humedad en el momento de la siembra del cultivo o cuando se inicia la preparación, el valor de 0 representa un perfil de suelo a CC y 100% en el punto de marchitez permanente. En la mayoría de los casos, solo se puede hacer una estimación de la

condición inicial de humedad del suelo en función del cultivo anterior y la época de siembra. En general, se usa un valor entre 0 y 30%.

La *Porosidad drenable (SAT-CC) [%]* es la diferencia entre el porcentaje de humedad a saturación y a capacidad de campo. El *Agotamiento crítico para grietas del fangueo [fracción]* es un valor entre 1 y 0, donde 1 representa un suelo donde se generan grietas en un punto cercano a capacidad de campo y el valor de 0 cuando el suelo está cerca al punto de marchitez permanente. La *Disponibilidad de agua en la siembra [% Agotamiento]* es similar al agotamiento inicial. Se expresa en 0 para indicar que se sembró sin estrés por humedad. La *Altura máxima de la lámina de agua [mm]*, en el caso de la siembra a curvas de nivel, está definida por la altura de los caballones o el nivel de lámina manejado en los lotes.

• Pestaña CWR (Crop Water Requirements)

Luego de tener configuradas las demás pestañas, en esta se muestra un resumen por cada 10 días (decadal) con los coeficientes de cultivo (K_c), las ET_c diarias y acumuladas (mm), la precipitación efectiva y los requerimientos de irrigación (mm). En el caso del cálculo de la huella hídrica, es de utilidad el valor de la ET_c que incorpora las características climáticas y estado

de humedad del suelo. En esta pestaña, inicialmente se hace un resumen de la evapotranspiración actual (ET_a), la precipitación efectiva y los requerimientos de irrigación sin tener en cuenta las prácticas específicas del

agricultor o el calendario específico programado. Estos valores pueden cambiar luego de definir un calendario e introducir valores de riegos realizados (Figura 28).

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Mar	1	LandPrep	1.05	5.03	20.1	0.0	188.7
Mar	2	LandPrep	1.05	5.37	53.7	121.1	0.0
Mar	3	LandPrep	1.05	5.34	58.7	0.0	386.7
Apr	1	Init	1.08	5.31	53.1	5.7	47.4
Apr	2	Init	1.10	5.05	50.5	85.3	0.0
Apr	3	Init	1.10	4.90	49.0	106.6	0.0
May	1	Deve	1.10	5.26	52.6	57.8	0.0
May	2	Deve	1.10	4.96	49.6	10.2	39.4
May	3	Deve	1.09	4.87	53.6	43.5	10.1
Jun	1	Mid	1.09	4.70	47.0	32.2	14.8
Jun	2	Mid	1.09	4.47	44.7	0.0	44.7
Jun	3	Mid	1.09	4.43	44.3	0.0	44.3
Jul	1	Mid	1.09	4.24	42.4	0.0	42.4
Jul	2	Mid	1.09	4.65	46.5	0.0	46.5
Jul	3	Late	1.08	4.94	54.3	0.0	54.3
Aug	1	Late	1.02	4.40	44.0	0.0	44.0
Aug	2	Late	0.97	4.61	23.1	0.0	23.1
					787.2	462.3	986.4

Figura 28. Pestaña de requerimientos hídricos.

• Pestaña Schedule

En esta pestaña, es posible ver y extraer un cronograma de riego programado por el aplicativo y el balance hídrico diario. Adicionalmente, es posible extraer valores

importantes para los cálculos de huella hídrica, por ejemplo, la ET_a , percolación (Percol.), pérdidas de riego (Loss) y otras variables como la entrada neta (Net Gift) y agotamiento de la saturación (Depl. SAT), que sirven para verificar los valores obtenidos en el balance (Figura 29).

Date	Day	Stage	Rain	Ks	Eta	Puddl	Percol.	DeplSM	Net Gift	Loss	DeplSAT
			mm	frac.	mm/day	state	mm	mm	mm	mm	mm
4 Apr	1	Init	0.0	1.00	2.4	Prep	0.0	3	0.0	0.0	164.0
5 Apr	2	Init	14.6	1.00	2.1	Broken	7.5	2	0.0	0.0	160.2
6 Apr	3	Init	50.6	1.00	2.6	Broken	34.8	3	0.0	0.0	146.5
7 Apr	4	Init	5.6	1.00	2.4	Broken	13.7	2	0.0	0.0	157.1
8 Apr	5	Init	6.2	1.00	2.4	Broken	7.1	2	0.0	0.0	160.4
9 Apr	6	Init	0.0	0.84	2.3	Broken	2.4	5	0.0	0.0	162.9
10 Apr	7	Init	0.0	0.47	1.2	Broken	0.8	6	0.0	0.0	163.6
11 Apr	8	Init	0.0	0.30	0.7	Broken	0.3	7	0.0	0.0	163.9
12 Apr	9	Init	0.0	0.22	0.6	Broken	0.1	7	0.0	0.0	164.0
13 Apr	10	Init	0.0	0.17	0.4	Broken	0.0	8	0.0	0.0	164.0
14 Apr	11	Init	0.0	0.14	0.4	Broken	0.0	8	0.0	0.0	164.0
15 Apr	12	Init	46.6	1.00	1.6	Broken	25.7	2	0.0	0.0	151.0
16 Apr	13	Init	0.2	1.00	2.5	Broken	8.6	4	0.0	0.0	153.7
17 Apr	14	Init	55.0	1.00	1.7	Broken	36.8	2	0.0	0.0	145.4
18 Apr	15	Init	6.8	1.00	2.4	Broken	15.7	2	0.0	0.0	156.1
19 Apr	16	Init	11.0	1.00	2.1	Broken	11.0	2	0.0	0.0	159.4
20 Apr	17	Init	0.2	1.00	2.4	Broken	3.7	4	0.0	0.0	162.1
21 Apr	18	Init	11.4	1.00	2.1	Broken	6.0	2	0.0	0.0	161.0

Totals			
Total gross irrigation	942.4	mm	
Total net irrigation	659.7	mm	
Total irrigation losses	0.0	mm	
Total percolation losses	1520.0	mm	
Actual water use by crop	391.1	mm	
Potential water use by crop	445.3	mm	
Efficiency irrigation schedule	100.0	%	
Deficiency irrigation schedule	12.2	%	
Total rainfall	1291.2	mm	
Effective rainfall	1291.2	mm	
Total rain loss	0.0	mm	
Moist deficit at harvest	0.0	mm	
Actual irrigation requirement	-845.9	mm	
Efficiency rain	100.0	%	

Yield reductions					
Stagelabel	A	B	C	D	Season
Reductions in ETc	15.0	17.1	6.1	21.4	12.2
Yield response factor	1.00	1.09	1.32	0.50	1.10

Figura 29. Pestaña de cronograma de riego.

Luego de obtener los valores iniciales del balance hídrico y programación del riego, con la finalidad de determinar los valores de percolación y pérdidas de riego y el ajuste de la ET_a , se deben ingresar los valores reales de riego neto. Para esto, se realiza lo siguiente:

Cálculo del riego neto diario

En este caso, luego de tener un resumen semanal de precipitación, riego, drenaje y el número de días con riego y el porcentaje de lámina proveniente del riego, se determina la lámina diaria a descontar del riego para obtener el riego diario neto. Así, tenemos la siguiente ecuación, donde Riego bruto diario es el riego medido (mm), Lámina diaria a descontar = drenaje semanal (mm) * % lámina proveniente del riego / # días de riego.

$$\text{Riego neto diario (mm)} = \text{Máximo [0, riego bruto diario (mm) - lámina diaria a descontar (mm)]}$$

Generación y carga del archivo de programación del riego (.SCH)*

Este proceso tiene tres partes. En el primero, se genera el archivo SCH con los valores programados inicialmente por CROPWAT. Para esto, teniendo abierto el archivo de programación de riego en *Archivo>Guardar como*, se guarda el archivo de programación inicial con extensión *.SCH y luego en *opciones>programación>momento de riego y aplicación de riego*, se seleccionan intervalos y láminas definidas por el usuario. En el segundo paso, se crea el archivo de la programación del riego, el cual tiene dos columnas: la primera de días de siembra y la segunda es la lámina neta aplicada. En la primera fila, se coloca el día de la siembra y la humedad inicial. En tercer lugar, se modifica el archivo de programación del riego y

en el archivo de la sesión (*.SES) se referencia el archivo para que sea cargado cuando se vuelva a iniciar la sesión. En este último proceso, se genera el archivo en un Excel, con una columna inicial en blanco, se seleccionan y pegan las tres columnas en el archivo *.SCH, el cual se abre en un editor de texto y finalmente en el archivo *.SES se modifica el *untitled* de la línea “*Scheduling file=untitled*” por la dirección del archivo. Luego de este proceso, cuando se vuelva a abrir el archivo, se cargará la programación de riego ejecutada y en la pestaña SCH podremos visualizar la ET_a ajustada, la percolación, el riego y las pérdidas de riego (Figura 30).

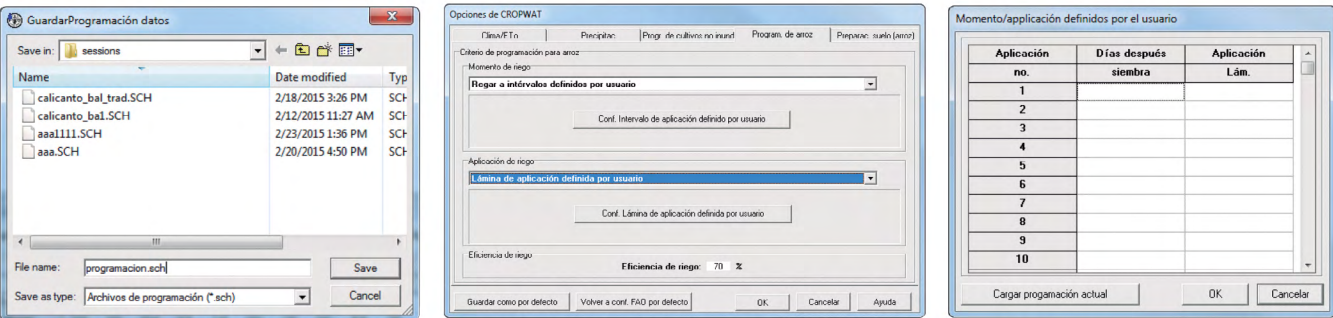


Figura 30. Archivo de programa de riego.

HUELLA HÍDRICA AZUL

En la agricultura, el uso del agua azul consiste en el suministro de las cantidades necesarias de agua a los cultivos mediante diversos métodos artificiales de riego. El agua de riego puede tomar diferentes formas una vez extraída de la fuente:

- Agua de riego evapotranspirada
- Agua de riego que se incorpora en un producto
- Agua evaporada en el almacenamiento o transporte
- Agua que no vuelve a la misma zona de flujo
- Agua que no vuelve en el mismo período de tiempo

$$HH_{\text{azul}} (m^3/\text{ton}) = \frac{(ET \text{ agua azul} + \text{Evaporación agua azul} + \text{Incorporación} + \text{Agua no retornada})}{\text{Rendimiento}}$$

El agua de riego que es evapotranspirada y la incorporada en el producto comercial se determina con base en la asignación de un porcentaje del total del agua que ingresa por riego y por precipitación, es decir, del total de agua evapotranspirada, una fracción corresponde a agua verde y otra a agua azul, al igual que con el agua incorporada en el producto. La evaporación de agua azul hace referencia al agua que se evapora durante el almacenamiento de agua (depósitos de agua artificiales),

transporte (canales abiertos) y tratamiento (evaporación del agua caliente que no se recoge).

Si se presenta una extracción de agua que no es usada y se libera en otra zona de captación en un lugar diferente o retorna en otro período de tiempo, por ejemplo, si se retira en un período seco y regresa en un período de lluvias, su extracción debe ser incorporada en la contabilidad de huella hídrica azul (Hoekstra et al., 2011).

Conceptos clave

Los métodos más comunes de riego son:

- Surcos.
- Inundación, generalmente en bancales o caballones.
- Aspersión, donde el riego distribuye el agua en gotas por la superficie de la tierra, asemejándose al efecto de la lluvia.
- Goteo o riego localizado, donde el riego libera gotas o un chorro fino, a través de los agujeros de una tubería plástica que se coloca sobre o debajo de la superficie de la tierra.

El sistema de riego más usado es por inundación y riego por surcos, otros sistemas emplean aspersores o gateros, que aunque sean técnicas que requieren una inversión inicial más grande y un manejo más intensivo, suponen una mejora importante en la eficiencia del uso del agua, y reducen las pérdidas.



Así como varía el tipo de sistema de riego, también la forma de ingreso de agua y el tipo de herramienta a implementar. En la agricultura, existen dos sistemas predominantes de ingreso de agua a un predio, a través de una tubería donde el agua se puede distribuir a un

sistema de riego por aspersión (Figura 31a) o un sistema de riego por goteo, o ingreso a través de un canal o acequia para un riego por gravedad o inundación (Figura 31b).



Figura 31. (a) Riego por aspersión en un cultivo de maíz y (b) por inundación en un cultivo de arroz.

En cualquiera de los dos escenarios, se debe garantizar que toda el agua sea conducida por una sección de medición y que en lo posible quede en la entrada del predio para asegurar que las pérdidas por ineficiencia del sistema de riego sean contabilizadas. Un ejemplo de pérdida de agua es en la fuga en las uniones en tubería, deriva en un riego por aspersión, evaporación de la superficie de agua del transporte en canal o almacenamiento, etc. Las pérdidas deben ser incluidas, ya que es agua que se extrae de un cuerpo hídrico y no retorna al mismo lugar de extracción o lo hace en una época diferente.

A continuación, se muestran algunas posibles alternativas para la medición del riego en sistemas donde el agua ingresa a través de tuberías o por gravedad a través de un canal.

Medición en sistemas de acceso de agua por tubería

En sistemas de riego por aspersión o goteo donde el agua es conducida por una tubería principal, la instalación de un medidor de caudal es la opción más práctica para contabilizar el agua. Estos se consiguen en el mercado desde $\frac{1}{2}$ hasta 4 pulgadas (Figura 32).



Figura 32. Medidor de caudal en un sistema de riego por aspersión.

La medición se da en m^3 y las lecturas se deben realizar antes y después de cada riego (Figura 33). La diferencia entre la medición final y la medición inicial representa el

volumen del agua que pasa a través del medidor en un período de tiempo dado. Al conocer el área de influencia del riego, se determina la lámina aplicada.



Figura 33. Lectura en un medidor de caudal.

En este tipo de sistemas (aspersión o gravedad), se asume que no se presenta escorrentía superficial, por tanto, toda el agua aplicada se infiltra en el suelo y no es necesario hacer un esquema de medición de salida de agua del riego, a diferencia de un riego por surcos o gravedad.

Medición en sistemas de acceso de agua por canal

En los sistemas de producción con riego por surcos o inundación donde el agua ingresa por gravedad, se debe canalizar su ingreso por una o varias entradas controlables. De la misma manera, las salidas de agua se deben encauzar por una o varias salidas controlables, ya que debido a la naturaleza del sistema, el volumen de agua que sale por escorrentía superficial es considerable a la hora de hacer el balance hídrico.

El primer paso es la adecuación de las entradas y salidas de agua por un canal, el segundo paso es la instalación de un aforo y, de ser posible, el tercero es la instalación de un sensor de registro de caudal.

Adecuación de las entradas y salidas de agua

- Identificar las entradas y salidas de agua al terreno.
- Contar con un canal o acequia recta de entre 7 y 10 m con una pendiente inferior al 2%.
- Las paredes y base del canal deben ser homogeneizadas y lograr una sección transversal aproximadamente uniforme, de forma trapezoidal preferiblemente.
- Por la acequia de entrada, debe pasar toda el agua de riego.
- El flujo aguas arriba y aguas abajo debe ser subcrítico, es decir, que se mueva libremente y en calma (Figura 34).



Figura 34. Adecuación de entradas y salidas de agua para instalación de un aforo.

En el caso de no poder asegurar estas condiciones, especialmente a la salida del agua del lote donde los espacios pueden ser reducidos, es posible hacer un canal de menor longitud y, antes del punto de ingreso al canal, se puede construir una caja recolectora de agua. Esto con el fin de lograr un flujo libre y en calma antes de que el agua pase al canal.

Instalación del aforo: Se recomienda instalar un aforo tipo *RBC* o un *aforo sin cuello (ASC)* de forma trapezoidal que pueden tener una longitud aproximada de 0.5 a 1 metro. Los aforadores se deben instalar de tal manera que la entrada de agua (aguas arriba) sea la sección donde se encuentra ubicada la mira (regla calibrada), y la salida (aguas abajo) sea la sección de la rampa. El agua, al pasar por un aforo con entrada de sección transversal conocida y graduada, tiene una altura sobre este que permite traducir directamente en un caudal en l/s (Figura 35).

Para la instalación, se debe asegurar que el canal de ingreso tenga aproximadamente 10 veces el ancho del aforo aguas arriba y 5 veces aguas abajo. El ancho de los aforos para 25 l/s son de 50 cm y para 50 l/s de 80 cm. Se debe ubicar el aforador hasta que la base quede al mismo nivel que la superficie base del canal, esto evitará turbulencias que dificulten la lectura del caudal en la regla.

- Impermeabilizar cuidadosamente los laterales entre el aforador y las paredes del canal para evitar filtraciones. Para este fin se emplea el mismo suelo del lugar.



Figura 35. Ubicación de un aforo tipo RBC.

- Instalar sobre suelo húmedo de manera que permita enterrarlo sin mucho esfuerzo, hasta que el fondo del aforo coincida con el fondo del canal.
- El aforador debe estar nivelado, en sentido transversal como en sentido longitudinal, para ello se requiere usar un nivel (Figura 36).



Figura 36. Instalación de un aforador de caudal.

Registro de datos de lectura en reglilla: En sistemas de riego por surco o donde no hay ingreso continuo del agua al lote y los riegos son espaciados en el tiempo, se requiere hacer lecturas en la reglilla una vez inicia el paso del agua por el aforador y lo más frecuente posible (entre 5 a 10 minutos entre cada lectura). Cuando el nivel del agua que pasa por el aforador, se estabiliza y se pueden hacer lecturas más espaciadas (30 minutos aproximadamente) según la duración total del riego. Una vez se corta el flujo de agua que ingresa al lote, se deben hacer lecturas más frecuentes hasta que el flujo se detiene por completo.

En cada riego, se debe registrar como mínimo la siguiente información:

- Fecha y hora de inicio del riego (cuando el agua comienza a pasar por el aforador).
- Hora y nivel sobre la reglilla de lectura.
- Fecha y hora de finalización del riego (cuando el agua deja de pasar por el aforador).
- Área efectiva de riego.

Las lecturas de caudal (lt/seg) se multiplican por el tiempo entre intervalos de medición y la sumatoria de los diferentes caudales es el total de riego aplicado en

lt o m³. Con el área de influencia del riego, se determina la lámina aplicada en cada riego. En sistemas de riego por inundación, donde el flujo de ingreso a la finca es continuo y por un período prolongado de tiempo, se recomienda realizar el mismo procedimiento pero con lecturas diarias.

Instalación de sensores de registro continuo de caudal

En el mercado, existen diferentes herramientas que, una vez instaladas en los aforadores, permiten hacer un registro continuo del caudal en lt/seg. Entre las múltiples opciones los sensores de ultrasonido se presentan como una opción confiable y de alta precisión. El sistema está constituido por un puente hecho en lámina que se acopla encima del aforador, dentro de este se encuentra el sensor ultrasónico y conectado a él un cable que transmite los datos al *datalogger* (Figura 37).

El sensor debe ser ubicado sobre la sección de aforo para realizar lecturas del nivel de la columna de agua y, a partir de esta, calcula el caudal que conduce el canal abierto. Los aforadores automáticos pueden tener un sistema de registro y almacenamiento de datos; sin embargo, se recomienda hacer verificaciones continuas mediante lecturas manuales en la reglilla (Figura 38).

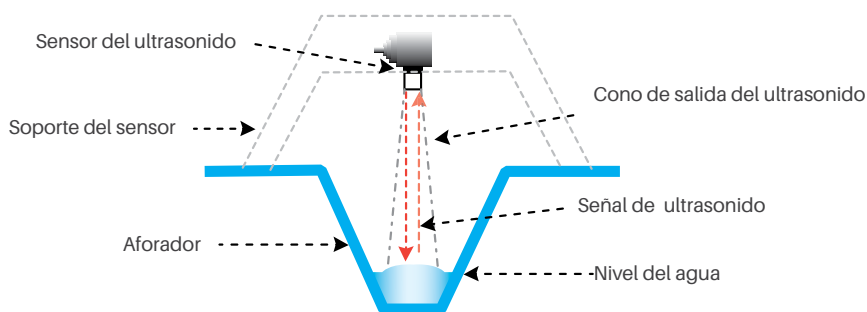


Figura 37. Funcionamiento de un sensor de ultrasonido.



Figura 38. Instalación de un sensor de ultrasonido y *datalogger*.

HUELLA HÍDRICA GRIS

El concepto de huella hídrica gris ha crecido a partir del reconocimiento que la medida de la contaminación del agua se puede expresar en términos del volumen de agua que se requiere para asimilar los contaminantes generados en un proceso de producción hasta los límites permisibles (Hoekstra et al., 2011; Franke et al., 2013). En la agricultura, la lixiviación de una sustancia química depende de los factores ambientales, de suelo y las prácticas agrícolas que se realicen. Los contaminantes comúnmente referenciados en sistemas agrícolas son los residuos de fertilización y pesticidas (Franke et al. 2013).

La huella hídrica gris se calcula dividiendo la carga contaminante que entra en un cuerpo de agua (L) sobre la diferencia entre el nivel máximo permisible de un contaminante (C_{max}) y la concentración natural del mismo (C_{nat}). La carga contaminante L se define así como la sobrecarga a la carga que ya figuraba en el cuerpo de agua receptor antes de la injerencia de la actividad considerada. La huella hídrica gris de cada contaminante debe ser calculada por separado, la HH_{gris} de un producto o proceso se toma como la HH_{gris} de mayor impacto de cada uno de los contaminantes evaluados (Hoekstra et al., 2011; Franke et al., 2013).

$$HH_{gris} (m^3/ton) = \frac{L (carga)}{C_{max} - C_{nat}}$$

Cálculo según tipo de descarga del contaminante

En los sistemas agrícolas, la principal fuente de contaminación de agua es difusa, vía aplicación de fertilizantes al suelo. De esta forma, se hace dispendioso cuantificar y cualificar el agua que sale del sistema. Para el cálculo de la HH_{gris} en este caso, la carga (L) está determinada por un factor alfa (α) que determina la fracción de lixiviación del compuesto y la cantidad de producto químico aplicado al suelo ($Appl$) (Franke et al., 2013).

$$L = \alpha \times Appl \left(\frac{\text{masa}}{\text{área}} \right)$$

$$HH_{gris} = \frac{\alpha \times Appl}{C_{max} - C_{nat}} \times \frac{1}{\text{Rendimiento}} \left(\frac{\text{Volumen}}{\text{masa}} \right)$$

Conceptos clave

Fuente puntual de contaminación: Ocurre cuando el contaminante es descargado directamente por un flujo de salida a un cuerpo de agua. La concentración del contaminante puede ser determinada por medio de análisis en laboratorio a una muestra tomada del efluente.

Fuente difusa de contaminación: Ocurre cuando una sustancia química (fertilizante o plaguicida) es aplicada al suelo y solo una fracción se lixivia hasta un cuerpo de agua subterráneo o es arrastrada por agua de escorrentía superficial. Dado que las condiciones del suelo pueden ser muy heterogéneas, no es claro donde medir y por tanto se hace difícil la toma de una muestra.

Concentración máxima de un contaminante (C_{max}): Concentración máxima permitida de un contaminante en un cuerpo de agua según la norma ambiental de calidad de agua de influencia en la zona.

Concentración natural de un contaminante (C_{nat}): Es la concentración de una sustancia química en un cuerpo de agua sin intervención humana. Para sustancias artificiales que no se presentan naturalmente en un ecosistema, el valor es de cero (Franke et al., 2013).

Para la estimación del α para condiciones específicas, se recomienda seguir la metodología planteada por Franke et al. (2013), donde se detalla el procedimiento para la estimación de la huella hídrica gris, para lo cual se hace necesario contar con información de:

- Condiciones climáticas
- Propiedades físicas y químicas del suelo
- Extracción de nutrientes por la planta
- Prácticas de manejo
- Propiedades químicas (en el caso de uso de pesticidas)

Sin embargo, existen diferentes herramientas para cuantificar el volumen de agua que sale del sistema de forma difusa vía percolación y otras para tomar una muestra para caracterización de calidad. Una vez se obtienen los valores reales, se puede usar el protocolo de cálculo de huella hídrica gris para fuentes puntuales de contaminación.

Medición de HH_{gris} en fuentes puntuales de contaminación

Cuando el contaminante se libera de forma directa a la fuente, la carga (L) puede ser determinada al medir la cantidad de agua que sale del sistema o volumen del efluente (Effl), la concentración del contaminante en el efluente C_{effl} , la cantidad de agua que ingresa al sistema (Abstr) ya sea en forma de lluvia o de riego y la concentración del contaminante en el agua de ingreso o concentración actual (C_{act}) (Franke et al. 2013)

$$HH_{gris} (m^3/ton) = \frac{L (carga)}{C_{max} - C_{nat}}$$

$$L = (E_{ffl} \times C_{effl} - Abstr \times C_{act}) \left(\frac{masa}{tiempo} \right)$$

$$HH_{gris} = \frac{(E_{ffl} \times C_{effl} - Abstr \times C_{act})}{C_{max} - C_{nat}} \times \frac{1}{Rendimiento} \left(\frac{Volumen}{tiempo} \right)$$

Conceptos clave

Abstracción de un cuerpo de agua (Abstr):

Es la cantidad de agua que es retirada de un cuerpo de agua e ingresa al sistema durante un ciclo productivo. La abstracción puede ser de agua lluvia ($Abstr_{pp}$), de agua de riego ($Abstr_{irr}$), o ambas según el manejo.

Efluente:

Aguas servidas con contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos que son emitidos por un sistema, generalmente a los cuerpos de agua (Hoekstra et al., 2011; Franke et al., 2013).

• Medición de la cantidad de efluentes (E_{ffl})

En la agricultura, los principales efluentes resultan de procesos como escorrentía superficial y percolación profunda, ambos producto de un evento fuerte de riego o precipitación. Como se menciona en el módulo de medición de huella hídrica verde y azul, existen diferentes herramientas para cuantificar la salida de agua por escorrentía superficial, entre estos, se resaltan la implementación de aforadores de caudal o el uso de parcelas de escorrentía (Figura 39).



Figura 39. Identificación de puntos de salida de agua por escorrentía superficial.

Para el caso de la cuantificación de salida de agua por percolación profunda, se menciona el uso de lisímetros de pesada, los cuales cuentan con un sistema de drenaje que es canalizado en un recipiente. Con el volumen de agua percolada y el área expuesta a riego o precipitación del mismo, se puede obtener el valor de agua percolada en m^3/ha (Figura 40). De igual manera, se pueden coleccionar con facilidad muestras de calidad de agua para su análisis en laboratorio. Los lisímetros ya han sido utilizados en varios estudios con el objetivo de estudiar

la lixiviación de fertilizantes y plaguicidas (Ceccon et al., 1995; Ohte et al. 1997; Zhao et al., 2010; Gu et al., 2015; Yang et al., 2015). La percolación también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo, como fue mencionado en el apartado de evapotranspiración. Las pérdidas por percolación se obtienen con base en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y el ingreso de agua por riego o fertilización.

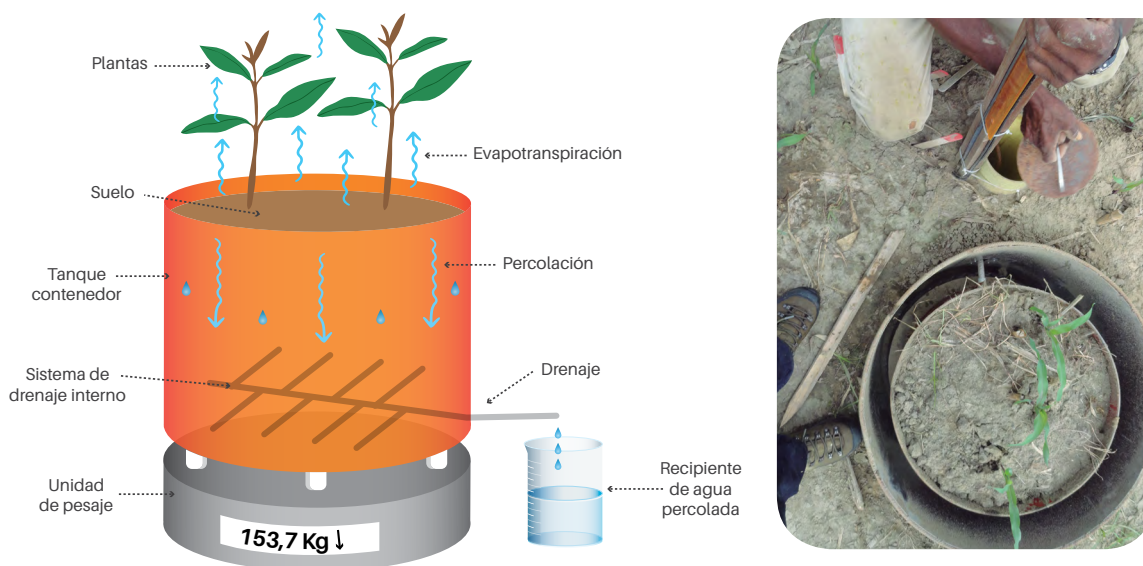


Figura 40. Cuantificación de agua de percolación profunda mediante un lisímetro de pesada.

· Medición de la concentración de contaminantes en el efluente (C_{eff})

La concentración de un contaminante en el efluente es entendida como la carga de una sustancia en el agua que sale del sistema (Franke et al., 2013). En los casos donde la salida de agua del terreno es puntual, la muestra

de agua puede ser tomada directamente. Tal es el caso del agua de escorrentía, que pasa por un aforrador a la salida de un riego, que se recolecta de una parcela de escorrentía, o de un canal de drenaje (Figura 41). En el caso de percolación profunda, la muestra puede ser coleccionada de un lisímetro de drenaje.



Figura 41. Toma de muestras de calidad de agua a la salida del lote.

Cuando la contaminación es difusa, caso de aplicación de fertilizantes y plaguicidas en suelo y no se cuente con sistemas de canalización de agua a un punto determinado, se sugiere la implementación de un lisímetro de succión. Este sistema permite extraer agua de la solución del suelo, mediante la creación de un vacío (presión negativa o succión) dentro del tubo toma-muestras, que sobrepasa la tensión del agua del

suelo. Esto establece un gradiente hidráulico para que la solución fluya a través de la cerámica porosa y entre en el tubo del lisímetro. Para un mejor seguimiento de la composición de la solución de suelo a través de todo el período de crecimiento del cultivo, se recomienda instalar por lo menos dos (2) lisímetros en la zona radicular de una planta representativa, uno en la parte superior y otro en la parte inferior de la zona radicular (Figura 42).

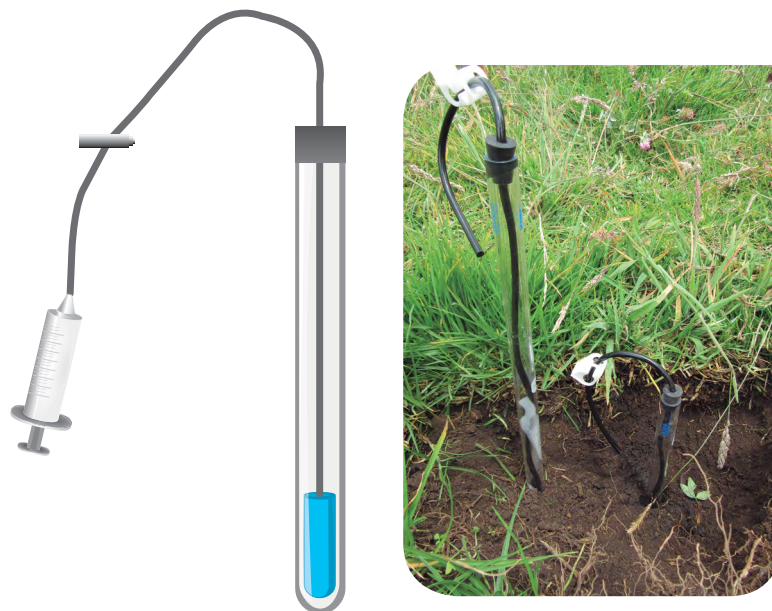


Figura 42. Uso de lisímetros de succión para toma de muestras de agua de percolación profunda.

En sistemas de riego por inundación, una opción es la construcción de tubos en PVC para la recolección de una muestra de agua profunda, el exceso de agua puede pasar fácilmente al tubo recolector a través de

una malla que evita el paso de material sedimentado. La altura de la malla depende de la profundidad deseada de extracción de agua (Figura 43).

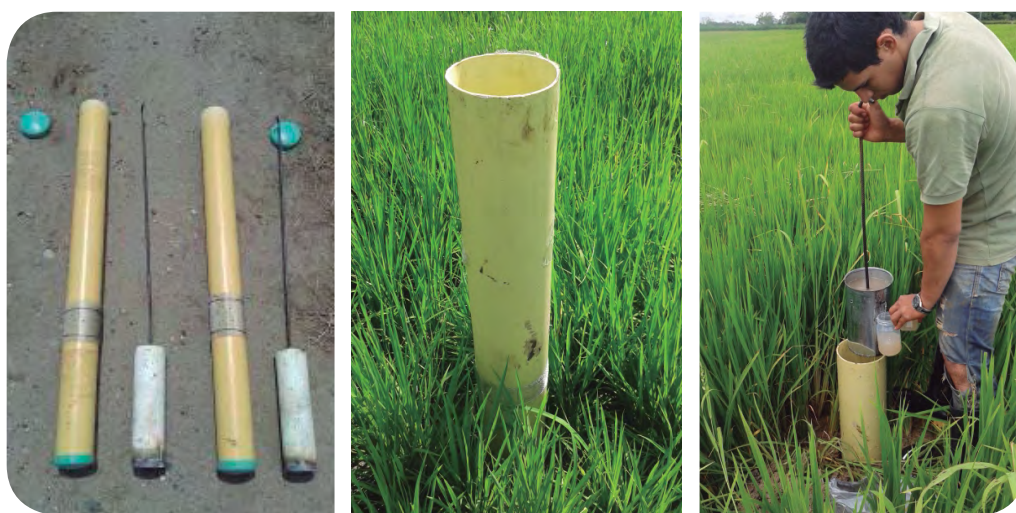


Figura 43. Tubos de recolección de muestras de agua percolada.

En cualquier caso, se recomienda coleccionar muestras después de un evento de riego o precipitación donde se espera una salida significativa de agua. En sistemas por inundación, donde la salida de agua es continua, se recomienda tomar una muestra semanal o quincenal. La frecuencia de los muestreos va a depender de la duración del ciclo del cultivo y la frecuencia de los eventos de ingreso y salida de agua del sistema.

Las muestras obtenidas deben ser refrigeradas desde el momento de la toma hasta su ingreso al laboratorio. La cantidad a coleccionar va a depender del número de

parámetros a caracterizar; sin embargo, se recomienda no coleccionar menos de 200 ml de agua.

En el mercado existe una amplia oferta de equipos de medición de calidad de agua. Algunos de ellos trabajan con el uso de tests de un elemento específico, donde se agrega un reactivo a la muestra para ser leído posteriormente en un espectrofotómetro portátil. Otros consisten en el uso de sondas que miden en tiempo real la concentración de un elemento químico en el agua. Aunque este tipo de sensores son de alta confiabilidad y fácil uso, sus costos son elevados y tiene poca oferta de parámetros a medir (Figura 44).



Figura 44. Equipos para caracterización de calidad de agua.

· Medición de la abstracción de un cuerpo de agua (Abstr)

En términos prácticos, la abstracción hace referencia al agua que entra al sistema por riego o precipitación. Como se menciona en los apartados de huella hídrica verde y azul, existen diferentes protocolos para cuantificar el caudal de ingreso, ya sea mediante el uso de pluviómetros o el uso de medidores y aforadores de caudal.

· Concentración actual del contaminante (C_{act})

La concentración actual del contaminante se refiere a la concentración que presenta el agua antes de ingresar

al sistema. Para el caso de los eventos en donde la entrada de agua al lote es producto de la precipitación, se recomienda tomar muestras en los tarros colectores que se distribuyeron dentro del predio. Para el caso de riego, se toman muestras de agua a la entrada del lote.

· Concentración natural del contaminante (C_{nat})

La concentración natural del contaminante es la concentración que debería tener en un cuerpo de agua sin alteraciones antrópicas. Las concentraciones naturales de contaminantes en el agua no se conocen con exactitud, pero se estima que son muy bajas por lo cual se asumen como cero (Franke et al., 2013).

· Concentración máxima permitida de una contaminante (C_{max})

Según la ubicación del lugar de estudio, se debe consultar la norma de los objetivos de calidad de los ríos de influencia en cada cuenca donde se depositan los efluentes del sistema productivo. A continuación, se muestra como ejemplo los objetivos de calidad para

la cuenca de los ríos Simijaca, Chiquinquirá y Suárez (Presidencia de la República de Colombia, 2009a) (Cuadro 1). Según las normas ambientales, cada río puede tener diferente clase de impacto según el tramo (Clase I, II, III, IV), de allí la importancia de georreferenciar los predios para saber el tramo del río sobre el cual están ejerciendo influencia (Figura 45).

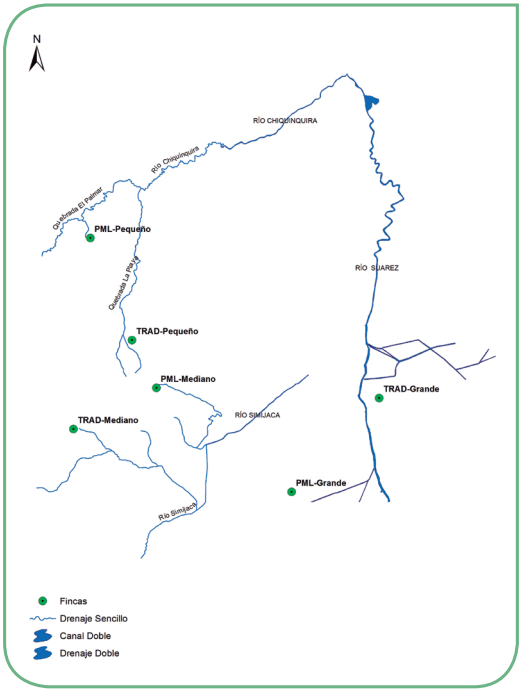


Figura 45. Ubicación de predios en la cuenca y tramo de influencia.

Cuadro 1. Objetivos de calidad para la cuenca de los ríos Simijaca, Chiquinquirá y Suárez.

	Clase	I	II	III	IV
Parámetros orgánicos	Demanda bioquímica de oxígeno DBO (mg/l)	7	10	20	50
	Oxígeno disuelto (mg/l)	>4	>4	>4	
Parámetros nutrientes	Nitrógeno amoniacal (mg/l)	-	-	0.3	
	Nitratos NO ₃ (mg/l)	10	10	1	
	Nitritos NO ₂ (mg/l)	1	1	0.5	10
	Fósforo total (mg/l)	-	-	0.1	
Sólidos	Sólidos suspendidos (mg/l)	-	-	20	30
	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	10	20		
Otros	Demanda química de oxígeno DQO (mg/l)				
	Cloruros (mg/l)	250	250	250	
	pH	5.5–9.0	4.5–9.0	5.0–9.0	4.0–9.0
	Sales (mg/l)	3000	-		3000
	Sulfatos (mg/l)	400	400	400	
	Turbiedad (unidades Jackson de turbiedad)	10	-		

Cuando no se cuenta con información de regulación de efluentes en la región, se puede usar como guía de referencia el Decreto 1575 de 2007, “por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano” (Presidencia

de la República de Colombia, 2009b). Si algunos contaminantes detectados en el efluente no están reglamentados a nivel nacional, se procede a referenciar a nivel internacional (Cuadro 2).

Cuadro 2. Límites máximos permitidos según autoridad nacional o internacional.

Contaminante	Niveles máximos permisibles (mg/l)	Institución	Fuente
Nitrato (N-NO ₃)	10	Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Resolución 2115 del 22 de Julio de 2007 (http://bit.ly/1LC2DQ7)
Nitrito (N-NO ₂)	0.1		
Fluoruros (F)	1.0		
Fosfato (PO ₄ ⁻³)	0.5		
Cloruro (Cl)	250		
Alcalinidad total (CaCO ₃)	300		
Dureza total (CaCO ₃)	300		
Sulfatos (SO ₄)	250		
AMONIO (N-NH ₄ ⁺)	35	Organización Mundial de la Salud	OMS, 2006

Cuando el sistema productivo incluye la fase de procesamiento y se hacen descargas a cuerpos de agua superficiales, se debe usar como guía de referencia la Resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos





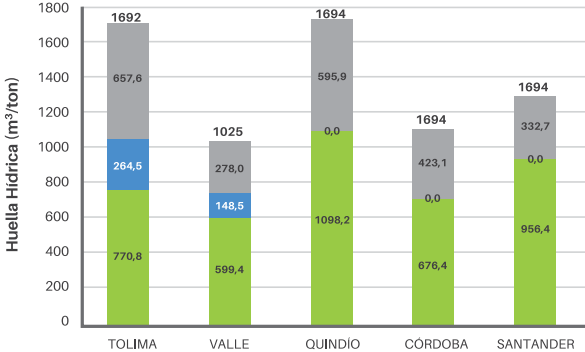
de aguas superficiales”. Igualmente se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades productivas de la agroindustria. Esta norma aplica para los vertimientos puntuales que se realicen a aguas marinas o al suelo (MinAmbiente, 2015) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales





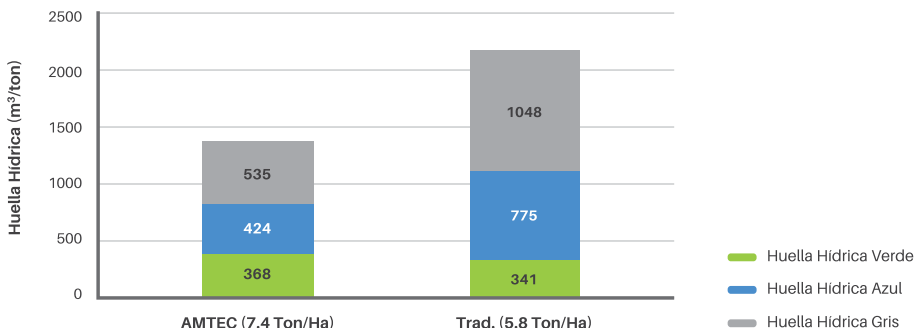
Parámetro	Unidades	Procesamiento de hortalizas, frutas, legumbres, raíces y tubérculos	Beneficio café	Poscosecha plátano y banano	Producción azúcar y derivados	Extracción de aceites vegetales
pH	Unidad pH	6 a 9	5 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l O ₂	150	650	200	900	1500
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/l O ₂	50	400	50	500	600
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	100	400	100	200	400
Sólidos sedimentables (SSD)	mg/l	5	10	5	2	2
Grasas y aceites	mg/l	10	10	10	20	20

Estudios de Caso




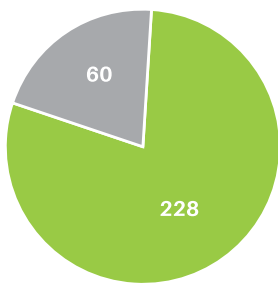
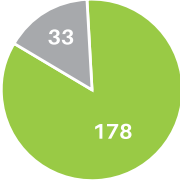
1. Medición de Huella Hídrica en el Cultivo de Maíz

Objetivo	Cuantificación de la huella hídrica - Construcción línea base y caracterización de sistemas																																								
Sistema productivo	Maíz tecnificado con y sin riego en parcelas experimentales de la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales (Fenalce)																																								
Unidad funcional	Tonelada de maíz																																								
Alcance	Huella hídrica directa																																								
Año	2013–2014																																								
Periodos evaluados	4 ciclos productivos																																								
Localidad	Espinal (Tolima), Buga (Valle del Cauca), Cereté (Córdoba), Sabana de Torres (Santander), Buena Vista (Quindío)																																								
Metodología	<div><div></div><div><p>Instalación de medidores de agua en tubería de riego por aspersión y aforadores de caudal en riego por gravedad con sensores de registro automático en entrada y salida.</p><p>Uso de pluviómetros automáticos, tanque evaporímetro, lisímetros neumáticos de pesada y sensores de humedad para cuantificar ET_c y percolación profunda.</p><p>Caracterización de la calidad de agua que ingresa (lluvia y riego) y sale del sistema (escorrentía superficial y percolación profunda). Uso de lisímetros de pesada y de succión para toma de muestras de percolación profunda. Cuantificación de los niveles de amonio, nitrato y fosfato.</p></div><div></div></div>																																								
Valor Huella Hídrica medido en campo	<div><div><p>1.360 m³/ton maíz promedio para las cinco localidades</p><table border="1"><thead><tr><th>Localidad</th><th>Huella Hídrica Verde (m³/ton)</th><th>Huella Hídrica Azul (m³/ton)</th><th>Huella Hídrica Gris (m³/ton)</th><th>Total (m³/ton)</th></tr></thead><tbody><tr><td>TOLIMA</td><td>770,8</td><td>264,5</td><td>657,6</td><td>1692</td></tr><tr><td>VALLE</td><td>599,4</td><td>148,5</td><td>278,0</td><td>1025</td></tr><tr><td>QUINDIO</td><td>1098,2</td><td>0,0</td><td>595,9</td><td>1694</td></tr><tr><td>CORDOBA</td><td>676,4</td><td>0,0</td><td>423,1</td><td>1694</td></tr><tr><td>SANTANDER</td><td>956,4</td><td>0,0</td><td>332,7</td><td>1694</td></tr></tbody></table></div><div><table border="1"><thead><tr><th>Componente</th><th>Porcentaje</th></tr></thead><tbody><tr><td>Huella Hídrica Verde</td><td>60%</td></tr><tr><td>Huella Hídrica Gris</td><td>34%</td></tr><tr><td>Huella Hídrica Azul</td><td>6%</td></tr></tbody></table></div></div>			Localidad	Huella Hídrica Verde (m³/ton)	Huella Hídrica Azul (m³/ton)	Huella Hídrica Gris (m³/ton)	Total (m³/ton)	TOLIMA	770,8	264,5	657,6	1692	VALLE	599,4	148,5	278,0	1025	QUINDIO	1098,2	0,0	595,9	1694	CORDOBA	676,4	0,0	423,1	1694	SANTANDER	956,4	0,0	332,7	1694	Componente	Porcentaje	Huella Hídrica Verde	60%	Huella Hídrica Gris	34%	Huella Hídrica Azul	6%
Localidad	Huella Hídrica Verde (m³/ton)	Huella Hídrica Azul (m³/ton)	Huella Hídrica Gris (m³/ton)	Total (m³/ton)																																					
TOLIMA	770,8	264,5	657,6	1692																																					
VALLE	599,4	148,5	278,0	1025																																					
QUINDIO	1098,2	0,0	595,9	1694																																					
CORDOBA	676,4	0,0	423,1	1694																																					
SANTANDER	956,4	0,0	332,7	1694																																					
Componente	Porcentaje																																								
Huella Hídrica Verde	60%																																								
Huella Hídrica Gris	34%																																								
Huella Hídrica Azul	6%																																								
Resultados principales	<ul style="list-style-type: none">La medición directa en campo permite identificar con mayor exactitud los valores reales de uso y consumo de agua, ya que el estimado para Colombia indica un valor significativamente mayor de HH_{Verde} (2.375 m³/ton) y menor de HH_{Gris} (189 m³/ton).La identificación de los puntos críticos de mayor consumo permitió generar consciencia sobre el manejo del agua y generar algunas estrategias para un uso más eficiente.Las diferencias presentadas en la HH de cada localidad son atribuidas a la cantidad de agua que ingresa al sistema por riego y precipitación según las necesidades del cultivo en cada región y al rendimiento de los materiales comúnmente sembrados en cada zona.Se caracteriza al NO₃ como el principal residuo producto de la fertilización y mayor determinante de la huella hídrica gris.																																								








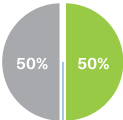
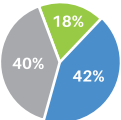
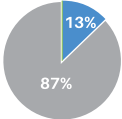
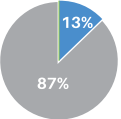
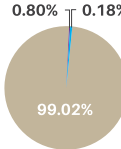
2. Medición de Huella Hídrica en el Cultivo de Arroz

Objetivo	Cuantificación de la huella hídrica en dos esquemas de manejo agronómico contrastantes para identificar prácticas más eficientes en el uso del agua														
Sistema productivo	Arroz en sistema de producción tradicional vs. el programa AMTEC (Adopción Masiva de Tecnología) promovido por la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz). En AMTEC, se incluye: <ul style="list-style-type: none">• Adecuación de suelos con <i>land plane</i> y caballones trazados con nivelación láser• Distancia entre caballones definida por la pendiente del lote• Manejo controlado del caudal de entrada de agua a los lotes														
Unidad funcional	Tonelada de arroz paddy														
Alcance	Huella hídrica directa														
Año	2013–2014														
Períodos evaluados	4 ciclos productivos														
Localidad	Alvarado, Lérída y Ambalema (Tolima)														
Metodología	<div><div></div><div><p>Instalación de aforadores de caudal en las entradas y salidas de agua del lote con sensores de ultrasonido y registro automático.</p><p>Uso de estación climatológica, con los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Se estimó la ET, la precipitación efectiva y percolación mediante el balance de humedad con el aplicativo CROPWAT.</p><p>Caracterización de la calidad de agua que ingresa (lluvia y riego) y sale del sistema (escorrentía superficial y percolación profunda). Toma de muestras de agua percolada mediante uso de tubos muestreadores. Cuantificación de los niveles de amonio, nitrato, fosfato y principales plaguicidas.</p></div><div></div></div>														
Valor Huella Hídrica medido en campo	<div><p>2.165 m³/ton de arroz paddy bajo manejo tradicional y 1.328 m³/ton arroz paddy bajo el esquema de manejo AMTEC</p><table><thead><tr><th>Componente</th><th>AMTEC (7.4 Ton/Ha)</th><th>Trad. (5.8 Ton/Ha)</th></tr></thead><tbody><tr><td>Huella Hídrica Verde</td><td>368</td><td>341</td></tr><tr><td>Huella Hídrica Azul</td><td>424</td><td>775</td></tr><tr><td>Huella Hídrica Gris</td><td>535</td><td>1048</td></tr></tbody></table></div>			Componente	AMTEC (7.4 Ton/Ha)	Trad. (5.8 Ton/Ha)	Huella Hídrica Verde	368	341	Huella Hídrica Azul	424	775	Huella Hídrica Gris	535	1048
Componente	AMTEC (7.4 Ton/Ha)	Trad. (5.8 Ton/Ha)													
Huella Hídrica Verde	368	341													
Huella Hídrica Azul	424	775													
Huella Hídrica Gris	535	1048													
Resultados principales	<ul style="list-style-type: none">• Mediante la cuantificación de la huella hídrica, se determinó el consumo de agua por el cultivo y permitió validar el impacto de nuevas tecnologías y prácticas de manejo sobre el recurso hídrico.• La implementación del manejo AMTEC, especialmente la correcta adecuación del terreno y manejo constante del módulo de riego, generó ahorros de agua de riego hasta en un 42%.• Las diferentes prácticas de manejo AMTEC dieron como resultado un aumento en el rendimiento, lo que genera un efecto positivo en el balance de agua usada y consumida por cada unidad de producto.• Se obtuvo una disminución de un 39% en la huella hídrica bajo un esquema de buenas prácticas de riego comparado con esquemas de producción tradicional.														

3. Medición de Huella Hídrica en el Cultivo de Papa

Objetivo	Cuantificación de la huella hídrica en dos esquemas de manejo agronómico contrastantes (tradicional vs. conservación) para identificar prácticas de manejo más eficientes en el uso del agua										
Sistema productivo	Papa en sistema de producción tradicional y sistema de producción bajo un esquema de agricultura de conservación, promovido por la Corporación Autónoma Regional (CAR) y apoyado técnicamente por la Fundación para el Desarrollo Sostenible Territorial (Fundesot). Se incluyen prácticas como: <ul style="list-style-type: none">• Uso de cobertura permanente• Preparación mínima del suelo• Rotación con abonos verdes• Uso racional de fertilizantes										
Unidad funcional	Tonelada de papa										
Alcance	Huella hídrica directa										
Año	2013–2014										
Periodos evaluados	3 ciclos productivos										
Localidad	Ubaté y Sibaté (Cundinamarca)										
Metodología		<p>Uso de estación climatológica, a partir de los datos registrados se estimó la ET_0, precipitación efectiva y percolación mediante el balance de humedad con el aplicativo CROPWAT. Implementación de lisímetros neumáticos de pesada para medición de ET_0, percolación y recolección de muestras de calidad de agua. Instalación de parcelas de escorrentía para determinar la cantidad y calidad del agua que sale del sistema.</p> <p>Caracterización de calidad de agua lluvia, agua de escorrentía superficial, mediante la implementación de parcelas de escorrentía, y calidad de agua de percolación profunda mediante el uso de lisímetros de drenaje y de succión. Cuantificación de los niveles de amonio, nitrato y fosfato.</p>	 								
Valor Huella Hídrica medido en campo	<p>288 m³/ton de papa bajo manejo tradicional y 211 m³/ton de papa bajo el esquema de conservación</p> <div><div><p>PAT (288 L/Kg)</p></div><div><p>PAC (211 L/Kg)</p></div><p>Vs</p></div> <table><tr><th colspan="2">Diferencias</th></tr><tr><td>Huella Gris:</td><td>27 L/Kg</td></tr><tr><td>Huella Verde:</td><td>50 L/Kg</td></tr><tr><td>Huella Total:</td><td>77 L/Kg</td></tr></table>			Diferencias		Huella Gris:	27 L/Kg	Huella Verde:	50 L/Kg	Huella Total:	77 L/Kg
Diferencias											
Huella Gris:	27 L/Kg										
Huella Verde:	50 L/Kg										
Huella Total:	77 L/Kg										
Resultados principales	<ul style="list-style-type: none">• La implementación de los ensayos permitió validar que la agricultura de conservación en papa disminuye la huella hídrica y la pérdida de suelo y nutrientes.• El sistema de conservación generó ventajas en términos de los costos de producción y oportunidades de nuevos mercados para la papa.• La rotación con abonos verdes generó una reducción de la huella hídrica entre un 14 a 20% con relación a la siembra de papa de forma tradicional.• En un sistema de conservación, es factible la reducción en la cantidad de fertilizantes aplicados sin comprometer rendimientos, lo que a su vez genera una disminución en la huella hídrica gris.• La reducción en la huella hídrica verde está asociada al uso de coberturas y una mejor conservación de la humedad en el suelo.										

4. Medición de Huella Hídrica en la Producción de Biodiesel de Palma de Aceite

Objetivo	Cuantificación de la huella hídrica en sistemas agrícola y sector agroindustrial
Sistema productivo	Palma de aceite con y sin riego y fase de extracción de aceite de palma y transformación en biodiesel
Unidad funcional	Tonelada de racimo de fruta fresca (RFF), tonelada de aceite crudo (ACP) y tonelada de biodiesel
Alcance	Huella hídrica directa e indirecta
Año	2014
Períodos evaluados	Un año de evaluación
Localidad	Copey (Cesar), Paratebueno (Cundinamarca), Cumaral y San Carlos de Guaroa (Meta)
Metodología 	<p>La huella hídrica azul de la fase del cultivo se calculó mediante la medición de las láminas de riego aplicadas. Uso de sondas de profundidad para la medición de la humedad de suelo y cálculo de la ET mediante el balance de humedad. Para la cuantificación de la huella hídrica gris, se modeló la contaminación potencial según cantidades de fertilizantes aplicados y coeficientes de lixiviación.</p> <p>En la fase industrial, se midió la cantidad de agua que ingresa al complejo industrial y la cantidad de efluentes. Para el cálculo de la huella hídrica gris, se contó con los valores mensuales de DQO en efluentes de planta extractora y planta de biodiesel.</p>      
Valor Huella Hídrica medido en campo	<p>1.377 m³/ton RFF sin riego y 1.181 m³/ton RFF con riego (directa)</p> <div> <p>HH Zona Oriental</p>  <ul style="list-style-type: none"> HH Verde (m³/ton RFF) HH Azul (m³/ton RFF) HH Gris (m³/ton RFF) </div> <div> <p>HH Zona Norte</p>  <ul style="list-style-type: none"> HH Verde (m³/ton RFF) HH Azul (m³/ton RFF) HH Gris (m³/ton RFF) </div> <p>49.9 m³/ton ACP y 11.6 m³/ton biodiesel (directa)</p> <div> <p>Extracción</p>  <ul style="list-style-type: none"> HH Verde (ton ACP) HH Azul (ton ACP) HH Gris (ton ACP) </div> <div> <p>Biodiesel</p>  <ul style="list-style-type: none"> HH Verde (ton Biodiesel) HH Azul (ton Biodiesel) HH Gris (ton Biodiesel) </div> <p>4.5 RFF ton RFF/ton ACP y 1.004 ton de ACP/ton biodiesel 6.294 m³/ton de Biodiesel (directa + indirecta)</p> <div> <p>HH Biodiesel</p>  <ul style="list-style-type: none"> Cultivo Biodiesel Extracción </div>
Resultados principales	<ul style="list-style-type: none"> En producción de biodiesel, la HH directa está relacionada con el gasto de agua en la fábrica y la HH indirecta con el gasto en la fase de cultivo. El 99% de la HH del biodiesel corresponde a la fase de cultivo para la producción de RFF, el 0.7% en la transformación a ACP y el 0.18% en la producción a biodiesel de palma. A pesar que en una de las plantaciones evaluadas fue necesaria la aplicación de riego, la HH generada fue menor debido que la mayor disponibilidad de agua para la planta se vio reflejada en un aumento en el rendimiento.

3. Medición de Huella Hídrica en Lechería Especializada

Objetivo	Cuantificación de la huella hídrica - Construcción línea base y caracterización del sistema
Sistema productivo	Sistema especializado de producción de leche con productores asociados a la Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegan)
Unidad funcional	Litro de leche
Alcance	Huella hídrica directa e indirecta
Año	2015
Períodos evaluados	Un año de producción
Localidad	Caldas, San Miguel de Sema (Boyacá) y Simijaca (Cundinamarca)
Metodología	<p>La huella hídrica en sistemas de producción animal se compone de la huella hídrica indirecta de la producción de alimentos, la huella hídrica directa relacionada con el consumo del agua por el animal y la huella hídrica directa relacionada con el uso de agua en servicios (Mekonnen y Hoekstra, 2010).</p> $HH_{animal} = HH_{alimento} + HH_{bebida} + HH_{servicios}$ <p><i>HH alimentación (indirecta):</i> Determinada por la huella hídrica de los diferentes alimentos consumidos, ya sea pastura, concentrados, silo o heno. Todo esto dividido entre la producción total del año, en caso de un sistema leche, el número de litros en un año (Mekonnen y Hoekstra 2010).</p> $HH_{alimento} = \frac{(Pastura * HH_{producción}) + (Suplemento * HH_{producción}) + HH_{mezcla}}{Producción Anual}$ <p>Cálculo de la ET de la pastura mediante el balance de humedad en el suelo, para lo cual se instalan sensores de humedad para medir cambios en la humedad, parcelas de escorrentía para determinar la escorrentía superficial. Con los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, se calcula la tasa de percolación profunda. Para el cálculo de la HH_{gris} se toman muestras de la calidad de agua lluvia, de escorrentía superficial y de percolación mediante el uso de lisímetros de succión.</p> <p>Se realizan aforos continuos de pasturas para determinar las cargas de pastoreo y el consumo por el hato. Adicionalmente, se contó con un registro detallado de suplementos suministrados a los animales con el fin de incluir cada huella hídrica dentro de la contabilidad.</p> <p><i>HH consumo animal y servicios (directa):</i> Instalación de un medidor de caudal para contabilizar el agua azul consumida en los bebederos y la usada en los servicios de los animales como lavado de ordeño y establos. Para la cuantificación de la huella hídrica gris, se colecta una muestra de agua producto del lavado.</p>
Valor Huella Hídrica medido en campo	<p>1.131.7 lt agua/lt leche</p>  <p>1.131.7 Lt</p> <ul style="list-style-type: none"> Pastura Suplemento Bebedero Servicios
Resultados principales	<ul style="list-style-type: none"> La cuantificación de la huella de hídrica en lechería especializada permitió cuantificar los usos de agua para la producción de pasturas y suplementos, y en usos de bebederos y servicios de los animales. Al hacer un análisis del uso y consumo de agua en diferentes fincas, se pudo identificar los puntos críticos y las prácticas que permiten un uso más eficiente del agua, tales como: <ul style="list-style-type: none"> Uso de barreras vivas Adecuada rotación de pasturas Implementación y mejoramiento de sistemas de conducción de agua Mejoramiento de bebederos e implementación de flotadores de cierre automático



Referencias

- Allen RG; Pereira LS; Raes D; Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. 323 p. Disponible en: <http://bit.ly/1FBOHzw>
- Arévalo D; Sabogal J; Lozano JG; Martínez JS. 2012. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. World Wildlife Fund (WWF). Reporte Colombia 2012. 48 p. Disponible en: <http://bit.ly/2eh92W0>
- Ceccon P; Dalla Costa L; Delle Vedove G; Giovanardi R; Peressotti A; Bastianel A; Zamborlini M. 1995. Nitrogen in drainage water as influenced by soil depth and nitrogen fertilization: a study in lysimeters. *European Journal of Agronomy* 4(3): 289–298. doi:10.1016/S1161-0301(14)80029-4
- Deloitte. 2012. Collective responses to rising water challenges. CDP Global Water Report 2012. Carbon Disclosure Project. 52 p. Disponible en: <http://bit.ly/2e5mzAh>
- Franke NA; Boyacioglu H; Hoekstra AY. 2013. Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines. Value of Water Research Report Series No. 65. 64 p. Disponible en: <http://bit.ly/2eCg8rc>
- Gu L; Liu T; Zhao J; Dong S; Liu P; Zhang J; Zhao B. 2015. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2):374–388. Disponible en: doi:10.1016/S2095-3119(14)60747-4
- Hoekstra AY; Hung PQ. 2002. Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11. 120 p. Disponible en: <http://bit.ly/2eCi03j>
- Hoekstra AY; Hung PQ. 2005. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change* 15(1):45–56. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004
- Hoekstra AY; Chapagain AK; Aldaya M; Mekonnen M. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Water Footprint Network 2011. Earthscan: Londres. 228 p. Disponible en: <http://bit.ly/2dihJx7>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri RK; Reisinger A (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 104 págs. Disponible en: <http://bit.ly/1LW7JE3>
- ISO (International Organization for Standardization). 2014. ISO 14046. Environmental Management. Water Footprint. Principles, requirements and guidelines.
- Jaramillo D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia. 619 p. Disponible en: <http://bit.ly/2c8RPQK>
- Khan L; Gil JA; Acosta R. 1998. Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial. *Bioagro* 10(1):11–17. Disponible en: <http://bit.ly/2e5qTzD>
- Martin EC. 2010. Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego. ¿Cuándo? University of Arizona. College of Agricultural and Life Sciences. Arizona Cooperative Extension. Arizona. 8 p. Disponible en: <http://bit.ly/2dqzAW3>
- Mekonnen MM; Hoekstra AY. 2010. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. Volume 2: Appendices. Value of Water. Research Report Series No. 48. Disponible en: <http://bit.ly/2e14WT4>
- MinAmbiente. 2015. Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Disponible en: <http://bit.ly/2efqV6H>
- Morales CF. 1996. Manual. Evaluaciones en la Parcela de Escorrentia y Erosión. Disponible en: <http://bit.ly/2ebYQCg>
- Ohte N; Tokuchi N; Suzuki M. 1997. An in situ lysimeter experiment on soil moisture influence on inorganic nitrogen discharge from forest soil. *Journal of Hydrology* 195(1–4):78–98. doi:10.1016/S0022-1694(96)03240-4

- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición. Vol. 1. 408 p.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2014. Un Objetivo Global para el Agua Post-2015: Síntesis de las Principales Conclusiones y Recomendaciones de ONU-Agua. Disponible en: <http://bit.ly/1fCVVr8>
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2012. Aguas saludables para el desarrollo sostenible. Estrategia Operativa del PNUMA para el Agua Dulce (2012–2016). Disponible en: <http://bit.ly/1dr76Rq>
- Presidencia de la República de Colombia. 2009a. Resolución 3462 de 2009. Por la cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez, a lograr en el año 2020.
- Presidencia de la República de Colombia. 2009b. Decreto 1575 de 2009. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- WMO (World Meteorological Organization). 2012. Guide to Agricultural Meteorological Practices (WMO-No. 134).
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2013. Business guide to water valuation: an introduction to concepts and techniques. 80 p. Disponible en: <http://bit.ly/2dUBDow>
- Yang X; Lu Y; Tong Y; Yin X. 2015. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat–maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization. Agriculture, Ecosystems and Environment 199:34–42. doi:10.1016/j.agee.2014.08.019
- Zhao C; Hu C; Huang W; Sun X; Tan Q; Di H. 2010. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China. Journal of Soils and Sediments 10(1):9–17. doi:10.1007/s11368-009-0063-3

Publicación CIAT No. 419

Diseño y diagramación	Claudia Lorena García
Edición de producción	Victoria Eugenia Rengifo
Fotografías	Miguel Romero Neil Palmer
Impresión	Velásquez Digital S.A.S. Cali, Colombia



Centro de Investigación de CGIAR

www.ciat.cgiar.org



Science for a food-secure future

www.cgiar.org

ISBN: 978-958-694-165-5
E-ISBN: 978-958-694-166-2